

23. Kantor L.Ya., Dorofeev V.M. Pomekhoustoychivost' priema ChM signalov [Immunity of receiving FM signals. Moscow: Svyaz', 1977, 335 p.
24. Mnogofunktional'nye komplekсы radiokontrolya i vyyavleniya kanalov utechki informatsii (perevod) [Multifunctional complexes for radio monitoring and detection of information leakage channels (translation)]. Moscow: Inostrannaya pechat'. Seriya "TCP sluzhb zarubezhnykh gosudarstv", VINITI [Foreign press. Series "TCP services of foreign states", VINITI], 2001, No. 12, pp. 35-37.
25. Priemniki preduprezhdeniya o radiolokatsionnom obluchenii (perevod) [Receivers of warning about radar exposure (translation)]. Moscow: Inostrannaya pechat'. Seriya "TCP sluzhb zarubezhnykh gosudarstv", VINITI [Foreign press. Series "TCP services of foreign states", VINITI], 2001, No. 2, pp. 14-20.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

**Беляев Денис Владимирович** – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: denisb2002@mail.ru; г. Таганрог, Россия; начальник подразделения.

**Губарев Дмитрий Егорович** – Южный федеральный университет; e-mail: skyraninmyworld@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра АиРПУ. аспирант.

**Румянцев Константин Евгеньевич** – e-mail: rke2004@mail.ru; зав. кафедрой ИБКТС; д.т.н.; профессор.

**Belyaev Denis Vladimirovich** – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: denisb2002@mail.ru; Taganrog, Russia; head of department.

**Gubarev Dmitriy Egorovich** – Southern Federal University; e-mail: skyraninmyworld@mail.ru; Taganrog, Russia; postgraduate student.

**Rumyantsev Konstantin Evgenevich** – e-mail: rke2004@mail.ru; head of the department of IBKTS; dr. of eng.sc.; professor.

УДК 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-39-49

**А.И. Комиссаров, К.Е. Бяков, В.Б. Холоденко, О.А. Корниенко**

## **РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОФИЛЬНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ДВУХЗВЕННОГО ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА**

*Способность многозвенного внутритрубного робота преодолевать изогнутые участки трубопроводов является важным показателем его профильной проходимости. Оценка данного показателя на этапе проектирования невозможна без проведения математического моделирования процесса пространственного движения робота с учетом силового взаимодействия движителей робота с трубопроводом. Целью данной работы является создание динамической модели для оценки профильной проходимости двухзвенного внутритрубного робота с колесными движителями. Разработка модели проводилась в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм» с использованием стандартных элементов описания механических систем и специально разработанной модели контактного взаимодействия колесных движителей робота с внутренней поверхностью трубопровода. Модель контактного взаимодействия колес с трубопроводом была создана в среде MATLAB и скомпилирована в динамически подключаемую библиотеку. Полученная динамическая модель верифицировалась по качественному поведению робота при движении через изогнутый участок трубопровода и графикам индикаторов профильной проходимости. Рассматривалось два варианта направления изгиба трубопровода. В качестве индикатора профильной проходимости было предложено использование минимального расстояния от выступающих электродвигателей актуаторов робота до внутренней поверхности трубопровода. Анализ результатов математиче-*

ского моделирования подтвердил адекватность поведения модели и показал, что разработанная динамическая модель может применяться для оценки профильной проходимости внутритрубного двухзвенного робота на ранних этапах проектирования до изготовления его натурного образца.

*Внутритрубный робот; модель контакта колесо–трубопровод; профильная проходимость внутритрубного робота.*

**A.I. Komissarov, K.E. Byakov, V.B. Kholodenko, O.A. Kornienko**

### **DEVELOPMENT OF THE MULTIBODY MODEL OF A TWO-UNIT IN-PIPE ROBOT FOR EVALUATION OF ITS CAPABILITY TO MOVE THROUGH A PIPELINE**

*The ability of a multi-unit in-pipe robot to drive through curved sections of a pipeline is an important indicator of its capability to move through the pipeline. At the design stage, this indicator cannot be verified without mathematical simulation of the robot spatial movement and interaction of its running gear with the pipeline. The objective of this work is to create a dynamical model for evaluation of the two-link in-pipe wheeled robot capability to drive through a pipeline. The model was developed in the Universal Mechanism multibody system simulation program with the use of its standard elements of the mechanical system modeling and a special-purpose wheel – pipeline contact model developed by the authors. The wheel – pipeline contact model was created in MATLAB and compiled as a DLL. The developed multibody model was verified by the robot behavior during its motion through a bent section of the pipeline and by the time histories of the indicators of its capability to drive through the pipeline. Two directions of the pipeline bend were studied. The minimum distance from the extruding electric motors of the robot actuators to the internal surface of the pipeline has been offered as an indicator of the robot ability to move through the pipeline. The analysis of the simulation results has proved the adequacy of the model behavior and showed that the developed multibody model can be used for the evaluation of the robot capability to move through the pipeline at the early design stages before fabrication of its prototype.*

*In-pipe robot; wheel–pipeline contact model; in-pipe robot capability to drive through a pipeline.*

**Введение.** Одним из технических требований к профильной проходимости многозвенного внутритрубного робота является способность преодолевать изогнутые участки трубопровода. Учитывая большое число звеньев робота, пространственный характер и множество точек потенциального контактного взаимодействия элементов робота с трубопроводом и между собой, оценку профильной проходимости робота на этапе проектирования невозможно выполнить без проведения математического моделирования процесса его движения через изогнутые участки трубопровода с учетом силового взаимодействия движителей робота с трубопроводом [1–13]. Целесообразно для решения данной задачи использовать один из программных комплексов автоматизированного динамического анализа систем тел [14–17]. Подобные программные комплексы автоматически формируют уравнения движения механической системы, описанной в виде набора тел, шарниров и силовых взаимодействий и позволяют проводить их решение численными методами, эффективными для жестких задач, к которым обычно относятся задачи контактного взаимодействия. В состав таких комплексов входят библиотеки готовых моделей контактных взаимодействий различных геометрических фигур, а также в них имеется возможность использования готовых моделей взаимодействия колесных движителей с различными неровностями. Однако, как показал проведенный анализ библиотек ряда программных комплексов и существующих моделей взаимодействия колесных движителей [18–20] с неровностями, модели, пригодные для описания взаимодействия элементов робота с замкнутой внутренней поверхностью изогнутого участка трубопровода, либо отсутствуют, либо имеют существенные ограничения по допустимой форме трубопровода. В связи с этим актуаль-

ной задачей является создание специальной модели контактного взаимодействия движителя робота с трубопроводом на одном из языков программирования и ее подключение к модели робота в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел в виде динамически подключаемой библиотеки.

В данной работе описывается динамическая модель двухзвенного внутри-трубного робота для оценки профильной проходимости, созданная в российском программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм» с использованием авторской модели контактного взаимодействия движителей робота с внутренней поверхностью трубопровода, и приводится пример ее применения.

**Динамическая модель ведущего модуля.** В данном исследовании внутри-трубный робот представлял собой комбинацию из двух последовательно расположенных одинаковых ведущих модулей, соединенных сцепным устройством. Динамическая модель ведущего модуля приведена на рис. 1–3.

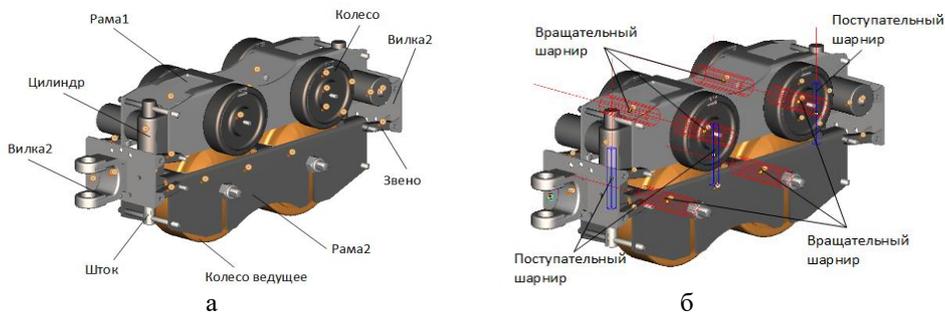


Рис. 1. Динамическая модель ведущего модуля:  
а – тела модели; б – шарниры модели

Площадки вилок крепятся к каждой раме модуля робота через два звена на вращательных шарнирах. Во избежание возникновения статической неопределенности эти кинематические связи заменены линейными силовыми, показанными на рис. 2.

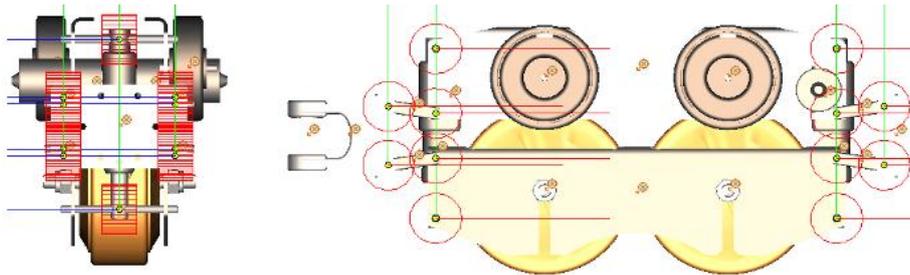


Рис. 2. Силовые элементы динамической модели ведущего модуля

В модели учитывается контактное взаимодействие площадок вилок с рамами модуля при помощи силовых контактных элементов *Точки – Плоскость*, как показано на рис. 3.

Контакт вилок сцепного устройства со сцепкой моделируется при помощи силовых контактных элементов *Точки – Плоскость*, показанных на рис. 4,б. Принятые в модели значения основных параметров контактного взаимодействия приведены в табл. 1.

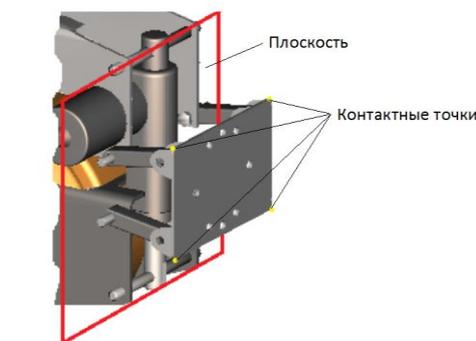


Рис. 3. Контактные силовые элементы динамической модели ведущего модуля

Динамическая модель сцепного устройства показана на рис. 4.

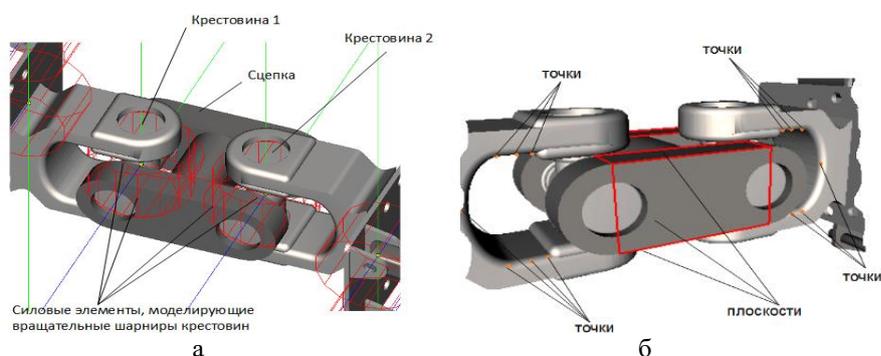


Рис. 4. Динамическая модель сцепного устройства: а – тела и силовые элементы; б – контактные силовые элементы

Таблица 1

**Основные параметры контактных элементов *Точки – Плоскость***

Параметр	Значение
Коэффициент контактной жесткости $c$ , Н/м	1e8
Коэффициент линейно-вязкого трения, Н с/м	1e5
Коэффициент трения, $f_s$	0.25

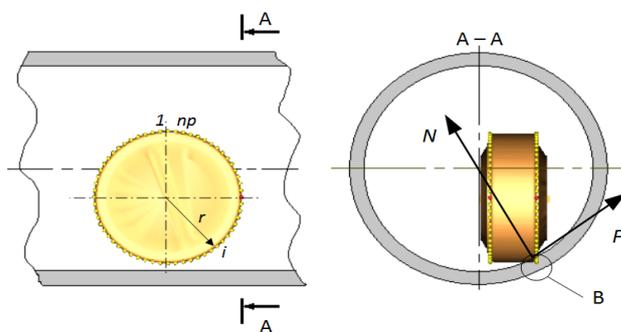


Рис. 5. Модель взаимодействия колеса с внутренней поверхностью трубопровода

На объекте исследования применены колеса из сплошного упругого материала. Взаимодействие такого колеса с внутренней поверхностью трубопровода в рамках задачи анализа профильной проходимости робота может быть описано при помощи модели контактного взаимодействия типа *точка – поверхность* с линейными характеристиками. С этой целью на двух кромках габаритного цилиндра колеса радиусом  $r$  задается по  $np$  точек, равномерно расположенных по окружности кромок, как показано на рисунке 5. Для каждой точки  $C_i$  в контакте с поверхностью трубопровода вычисляются нормальная сила  $N$  и сила трения  $F$  (см. рис. 5):

$$N = c \cdot d + b \cdot d',$$

где  $c$  – коэффициент контактной жесткости точки контакта;  $b$  – коэффициент линейно-вязкого трения точки контакта;  $d$  – нормальная деформация в точке контакта;  $d'$  – скорость нормальной деформации в точке контакта;

$$F = - \text{sign}(vs) \cdot N \cdot fs,$$

где  $vs$  – скорость скольжения точки контакта относительно поверхности трубопровода;  $fs$  – коэффициент трения скольжения для пары *материал колеса – материал трубопровода*.

Параметры модели контактного взаимодействия подбираются на основании экспериментальных данных по обжатию и прокатыванию колеса в трубопроводе. Значения параметров контактного взаимодействия, принятые в данной работе, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры контактного взаимодействия точки колеса с поверхностью трубопровода**

Параметр	Значение
Коэффициент контактной жесткости $c$ , Н/м	75000
Коэффициент линейно-вязкого трения, Н с/м	100
Число точек на окружности, $np$	121
Коэффициент трения пары <i>материал колеса – материал трубопровода</i> , $fs$	0.3

Данная модель взаимодействия движителя с трубопроводом реализована в программном комплексе MATLAB\Simulink и скомпилирована в динамически-подключаемую библиотеку, которая подключалась к динамической модели робота в программном комплексе автоматизированного анализа систем тел «Универсальный механизм».

**Управление продольной скоростью ведущего модуля.** Управление скоростью модуля робота производилось по модели пропорционального регулятора, изменявшего крутящий момент ведущего колеса по формуле:

$$M_i = s\_acc(e\_v) \cdot M(n_i),$$

где  $M(n_i)$  – зависимость момента  $i$ -го электродвигателя ведущего колеса от скорости  $n_i$  вращения ротора  $s\_acc(e\_v)$  – зависимость управляющего сигнала электродвигателя от ошибки  $e\_v$  регулирования.

Ошибка регулирования продольной скорости вычислялась по формуле:

$$e\_v = V0 - Vx,$$

где  $V0$  – требуемая скорость ведущего модуля;  $Vx$  – текущая скорость точки  $O$  нижней рамы в проекции на продольную ось нижней рамы.

**Моделирование движения внутритрубного робота в изогнутом участке трубопровода.** Для демонстрации пригодности созданной модели внутритрубного робота для оценки профильной проходимости проводилось моделирование его движения со скоростью 0.1 м/с в изогнутом участке трубопровода с осевым радиусом  $R$ гиба трубы, равным двум внутренним диаметрам  $D = 320$  мм. Схема участка трубопровода приведена на рис. 6.

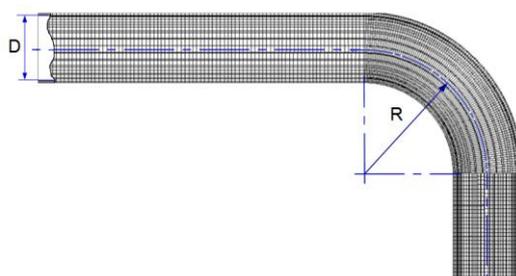


Рис. 6. Схема изогнутого участка трубопровода. Вид сверху

При этом рассматривалось два варианта направления изгиба трубопровода: вправо (как показано на рис. 6) и влево (зеркально отраженный вариант рис. 6). Использовались взаимные расположения модулей робота, показанное на рис. 7. Расстояние между осями ведущих колес и колес рамы 1 задавалось из условия обеспечения на четырех колесах рамы 1 вертикальных (для переднего модуля) или боковых (для заднего модуля) реакций, равных в сумме весу модуля.

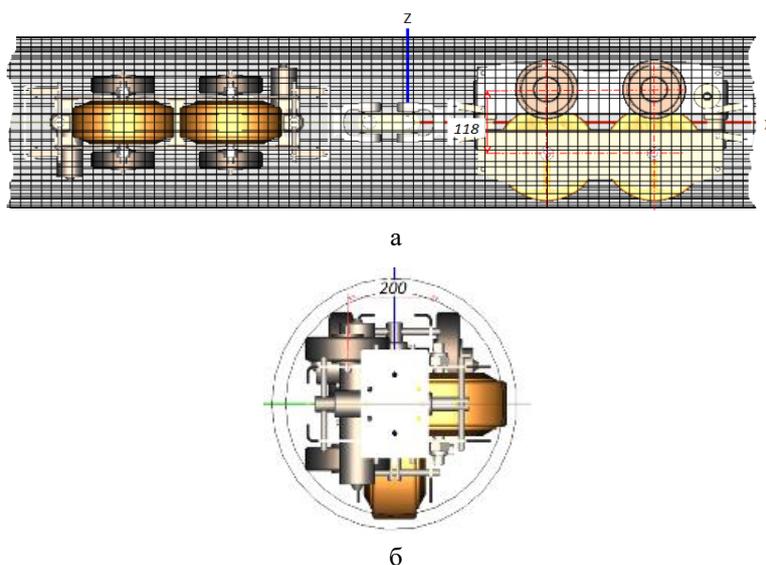


Рис. 7. Конфигурация двухзвенного робота: задний по ходу модуль повернут относительно переднего модуля на  $180^\circ$  вокруг оси  $Z$  и на  $90^\circ$  вокруг оси  $X$ :  
а – вид справа; б – вид сзади

Профильная проходимость робота на изогнутом участке трубопровода ограничивается при задевании поверхности трубопровода выступающими элементами модулей робота. Наиболее опасной с точки зрения прочности робота является си-

туация задевания трубопровода двигателями актуаторов поступательного перемещения рам модулей. Поэтому в качестве индикатора способности преодоления изогнутого участка выбран неотрицательный минимум расстояния от корпусов электродвигателей актуаторов до внутренней поверхности трубопровода в процессе движения. В качестве расстояния от корпуса электродвигателя актуатора до поверхности трубопровода в данном исследовании принималось минимальное расстояние от окружности кромки внешнего торца габаритного цилиндра корпуса электродвигателя до поверхности трубопровода.

В табл. 3 приведены минимумы расстояний от корпусов электродвигателей актуаторов до трубопровода, полученные в результате моделирования.

Таблица 3

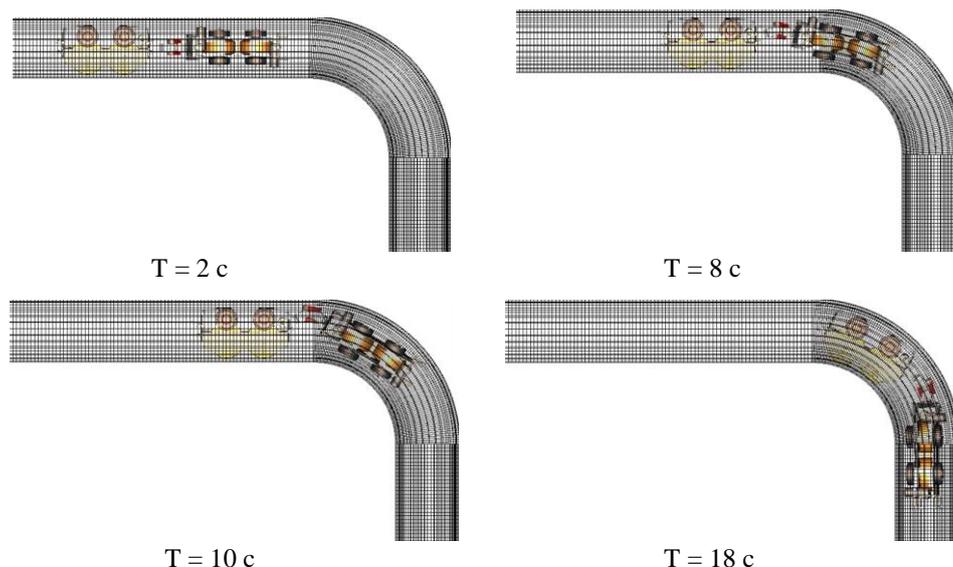
**Минимумы расстояний от электродвигателей актуаторов до внутренней поверхности трубопровода при движении через изогнутый участок**

Параметр	Изгиб трубопровода вправо	Изгиб трубопровода влево
Минимальное расстояние от актуатора до трубопровода, мм	6	-1

Из таблицы видно, что при изгибе трубопровода вправо задевания отсутствуют, и имеется положительный запас по расстоянию до трубопровода. При изгибе трубопровода влево происходит задевание его поверхности (запас по расстоянию до трубопровода отрицательный).

На рис. 8 приведены кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода, а на рис. 9 – графики изменения расстояний от кромок внешних торцов электродвигателей актуаторов для случая изгиба трубопровода вправо.

На рис. 10 приведены кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода, а на рис. 11 – графики изменения расстояний от кромок внешних торцов электродвигателей актуаторов для случая изгиба трубопровода влево. Из графиков рис. 12 видно, что задевание происходит электродвигателем первого по ходу актуатора переднего модуля.



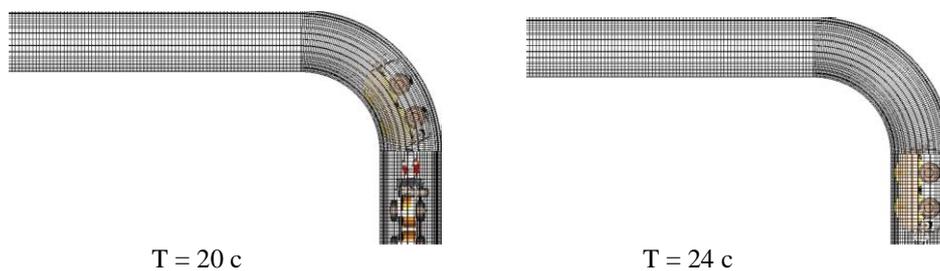


Рис. 8. Кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода с радиусомгиба  $R = 2 \cdot D$ . Поворот вправо

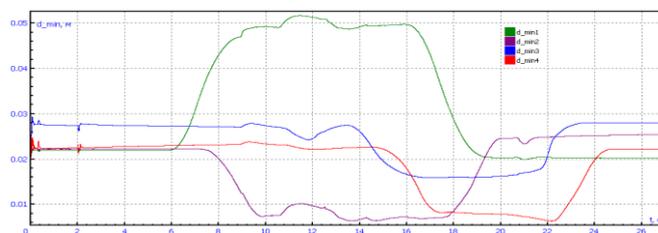


Рис. 9. Расстояния от кромок внешних торцев электродвигателей актуаторов при движения робота в изогнутом участке трубопровода с радиусомгиба  $R = 2 \cdot D$ . Актуаторы пронумерованы против хода движения робота

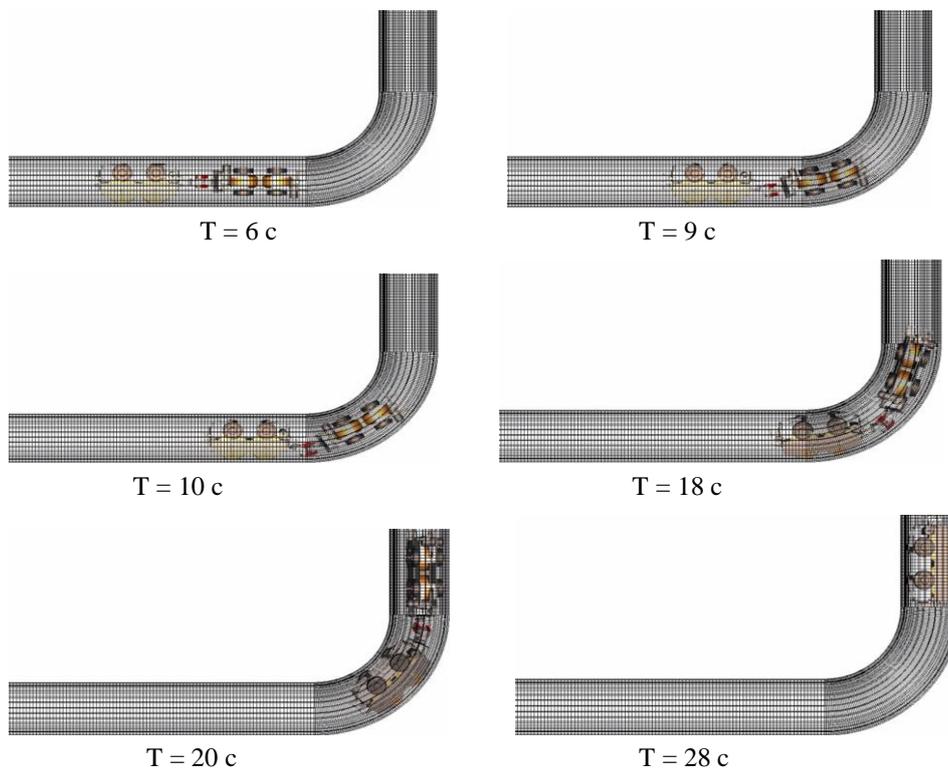


Рис. 10. Кадры анимации движения робота в изогнутом участке трубопровода с радиусомгиба  $R = 2 \cdot D$ . Поворот влево

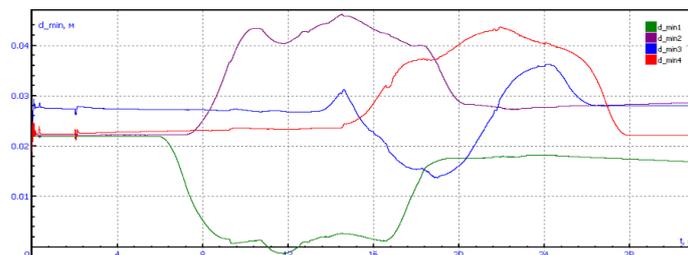


Рис. 11. Расстояния от кромок внешних торцов электродвигателей актуаторов при движения робота в изогнутом влево участке трубопровода с радиусомгиба  $R = 2 \cdot D$ . Актуаторы пронумерованы против хода движения

**Заключение.** Разработанная динамическая модель двухзвенного внутри-трубного робота с колесными движителями позволяет проводить оценку профильной проходимости на изогнутом участке трубопровода на ранних этапах проектирования, предшествующих изготовлению образца робота. Данная модель также может быть в дальнейшем использована для оптимизации конфигурации модулей робота и отработки алгоритмов управления ведущими колесами и актуаторами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Golubkin I.A., Antonov O.V. Research and modeling of gas pipeline inspection by mobile wheeled robot // Vestnik of astrakhan state technical university. Series: Management, Computer Science & Informatics. – 2014. – No. 2.
2. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 113. – P. 02016.
3. Savin S., Vorochaeva L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2017. – P. 1-6.
4. Kim H.M. et al. Novel mechanism for in-pipe robot based on a multiaxial differential gear mechanism // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2016. – Vol. 22, No. 1. – P. 227-235.
5. Kazeminasab S. et al. Design, Characterization, and Control of a Size Adaptable In-pipe Robot for Water Distribution Systems // 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2021. – Vol. 1. – P. 39-46.
6. Jung C.D. et al. Optimal mechanism design of in-pipe cleaning robot // 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – IEEE, 2011. – P. 1327-1332.
7. Nguyen T.T. et al. Dynamic modeling and its analysis for PIG flow through curved section in natural gas pipeline // Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (Cat. No. 01EX515). – IEEE, 2001. – P. 492-497.
8. Hu Z., Appleton E. Dynamic characteristics of a novel self-drive pipeline pig // IEEE Transactions on Robotics. – 2005. – Vol. 21, No. 5. – P. 781-789.
9. Mirshamsi M., Rafeeyan M. Dynamic Analysis of Pig through Two and Three Dimensional Gas Pipeline // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2015. – Vol. 8, No. 1.
10. Kwon Y.S. et al. A flat pipeline inspection robot with two wheel chains // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2011. – P. 5141-5146.
11. Zhang L., Wang X. Stable motion analysis and verification of a radial adjustable pipeline robot // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – IEEE, 2016. – P. 1023-1028.
12. Shi Y., Tang D. Adaptive control characteristics of pipeline inspection traction device // Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science). – 2012.
13. Hong Z., Yang W. Development of an Adaptive Vehicle for In-Pipe Inspection Task // ICPTT 2011: Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines. – 2011. – P. 1081-1089.
14. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем. – Режим доступа: <http://www.umlabor.ru> (дата обращения: 24.07.2021). Заглавие с экрана.

15. EULER – программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем. – Режим доступа: <http://www.euler.ru> (дата обращения 24.07.2021). Заглавие с экрана.
16. ФРУНД. – Режим доступа: <http://frund.vstu.ru/> (дата обращения: 10.11.2021). Заглавие с экрана.
17. Adams. The Multibody Dynamics Simulation Solution. – Режим доступа: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения: 24.07.2021). Заглавие с экрана.
18. Gorelov V.A., Komissarov A.I. Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 1322-1328.
19. Gipser M. FTire—the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics // *Vehicle System Dynamics*. – 2007. – Vol. 45, No. S1. – P. 139-151.
20. Besselink I.J. M. et al. The SWIFT tyre model: overview and applications. – 2004. – P. 525-530.

## REFERENCES

1. Golubkin I.A., Antonov O.V. Research and modeling of gas pipeline inspection by mobile wheeled robot, *Vestnik of astrakhan state technical university. Series: Management, Computer Science & Informatics*, 2014, No. 2.
2. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes, *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017, Vol. 113, pp. 02016.
3. Savin S., Vorochaeva L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes, *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE, 2017, pp. 1-6.
4. Kim H.M. et al. Novel mechanism for in-pipe robot based on a multiaxial differential gear mechanism, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, Vol. 22, No. 1, pp. 227-235.
5. Kazeminasab S. et al. Design, Characterization, and Control of a Size Adaptable In-pipe Robot for Water Distribution Systems, *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, 2021, Vol. 1, pp. 39-46.
6. Jung C.D. et al. Optimal mechanism design of in-pipe cleaning robot, *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2011, pp. 1327-1332.
7. Nguyen T.T. et al. Dynamic modeling and its analysis for PIG flow through curved section in natural gas pipeline, *Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (Cat. No. 01EX515)*. IEEE, 2001, pp. 492-497.
8. Hu Z., Appleton E. Dynamic characteristics of a novel self-drive pipeline pig, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, Vol. 21, No. 5, pp. 781-789.
9. Mirshamsi M., Rafeeyan M. Dynamic Analysis of Pig through Two and Three Dimensional Gas Pipeline, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2015, Vol. 8, No. 1.
10. Kwon Y.S. et al. A flat pipeline inspection robot with two wheel chains, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2011, pp. 5141-5146.
11. Zhang L., Wang X. Stable motion analysis and verification of a radial adjustable pipeline robot, *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2016, pp. 1023-1028.
12. Shi Y., Tang D. Adaptive control characteristics of pipeline inspection traction device, *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012.
13. Hong Z., Yang W. Development of an Adaptive Vehicle for In-Pipe Inspection Task, *ICPTT 2011: Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines*, 2011, pp. 1081-1089.
14. Universal'nyy mekhanizm. Modelirovanie dinamiki mekhanicheskikh sistem [Universal mechanism. Modeling the dynamics of mechanical systems]. Available at: <http://www.umlub.ru> (accessed 24 July 2021).
15. EULER – programmnyy kompleks avtomatizirovannogo dinamicheskogo analiza mnogokomponentnykh mekhanicheskikh sistem [EULER – software package for automated dynamic analysis of multi-component mechanical systems]. Available at: <http://www.euler.ru> (accessed 24 July 2021).
16. FRUND [FRUND]. Available at: <http://frund.vstu.ru/> (accessed 10 November 2021).
17. Adams. The Multibody Dynamics Simulation Solution. Available at: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (accessed 24 July 2021).

18. Gorelov V.A., Komissarov A.I. Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction, *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 1322-1328.
19. Gipser M. FTire—the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 2007, Vol. 45, No. S1, pp. 139-151.
20. Besselink I.J. M. et al. The SWIFT tyre model: overview and applications, 2004, pp. 525-530.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Н.Н. Болотник.

**Комиссаров Александр Игоревич** – МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Москва, Россия; тел.: 89037403586; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

**Быков Константин Евгеньевич** – e-mail: konst.byakov@yandex.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

**Холоденко Вячеслав Борисович** – e-mail: komissarov@bmstu.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; аспирант.

**Корниенко Олег Александрович** – Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Москва, Россия; директор.

**Komissarov Aleksandr Igorevich** – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Moscow, Russia; phone: +79037403586; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Byakov Konstantin Evgen'yevich** – e-mail: konst.byakov@yandex.ru; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kholodenko Vyacheslav Borisovich** – e-mail: komissarov@bmstu.ru; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; post-graduate student.

**Kornienko Oleg Aleksandrovich** – Science Engineering Centre Robotics Automatic, Bauman Moscow State Technical University; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Moscow, Russia; director.

УДК 519.872

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-49-60

**Д.А. Мищенко, А.А. Львов, Светлов М.С., А.А. Никифоров, А.Р.Д. Алалван**

### **ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

*Предложена полумарковская модель телекоммуникационной сети. Рассмотрен вариант динамического управления трафиком системы массового обслуживания как частного случая телекоммуникационной сети. Основная цель управления – минимизация средних затрат в единицу времени на обслуживание входящего потока информации (пакетов). При этом учтены различная пропускная способность каналов, скорость обработки информации в канале и информационная емкость буферов. Предложен подход к организации динамического управления с учетом помехоустойчивости (информационной надежности) и помехозащищенности (защиты информации). Рассмотрена задача динамического управления телекоммуникационной сетью на примере простой одноканальной структуры типа «точка-точка», которая моделируется как линейная однонаправленная Марковская цепь. Были введены параметры тарифа обслуживания, стоимости штрафа за отказ от обслуживания. Анализ позволяет сделать следующие замечания, что распределение входного информационного потока пакетов – пуассоновское, закон распределения длины пакетов и скорости их поступления имеет экспоненциальный характер, что в совокупности характеризует Марковский процесс. Однако одновременно имеют место задержки в обслуживании по отношению к моментам времени поступления запросов на обслуживание, включая задержки, связанные с переполнением буфера. Предложенная полумарковская модель телекоммуникационной сети может быть использована и для более сложных сетевых*