

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/article_5abfc9c46d1462.45506145

Ворочаева Л.Ю., канд. техн. наук, доц.,
Савин С.И., канд. техн. наук, доц.
Юго-Западный государственный университет

КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ РОБОТОВ, ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ПО ТРУБАМ

mila180888@yandex.ru

Роботы, перемещающиеся по трубам, разрабатываются для решения различных задач, связанных с обследованием или ремонтом трубопроводов. К ним можно отнести построение карты трубопровода, проверку трубопровода на наличие повреждений и отложений, поиск дефектов, выявление ремонтпригодности трубопровода, сбор информации о свойствах трубы и динамике изменения этих свойств. Перечисленные задачи имеют существенную практическую значимость, и экономически целесообразно решать их с использованием роботов. Для определения круга задач, решаемых тем или иным роботом, необходимо установить его место в многообразии существующих конструкций, выявить особенности его перемещения и навигации по трубопроводу. Наиболее удобным средством для этого является использование классификаций роботов по различным критериям. В статье проведен обзор классификаций внутритрубных роботов, установлены классификационные признаки, введенные ими. Основным существенным недостатком всех рассмотренных классификаций является невозможность однозначного определения в них места каждого робота, их недостаточная детализация. Поэтому в работе предложена новая классификация роботов, предназначенных для перемещения по трубам, в основу которой положены восемь критериев: 1) поверхность трубы, по которой перемещается робот, 2) управляемость конструкции (активность или пассивность), 3) тип контакта с поверхностью трубы, 4) возможности движения "с распором" и управления нормальными реакциями в опорах, 5) возможность управления силой трения в опорах, 6) вид опорного элемента, 7) типы привода и 8) трансмиссии. Путем сочетания указанных классификационных признаков можно выявить особенности каждой конструкции робота, что позволит установить круг задач, которые может решать данный робот.

Ключевые слова: *внутритрубные роботы, классификационные признаки, тип контакта, управление трением, тип контактного элемента, тип привода и трансмиссии.*

Введение. Роботы для перемещения по трубам представлены большим числом разнообразных конструкций, отличающихся по целому ряду признаков, поэтому для определения принадлежности роботов к той или иной конструктивной группе необходимо ввести их классификации. Рассмотрим классификации роботов для перемещения по трубопроводам, описанные в публикациях по данной тематике.

В работе [1] предлагается подразделять роботов, предназначенных для перемещения в трубах, на семь классов по типу перемещения: колесные, червеподобные, шагающие, ввинчивающиеся, ползающие, движущиеся вместе с потоком жидкости (устройства типа PIG) и пассивные роботы. В работах [2–4] приведена классификация внутритрубных роботов, также разделяющая их на семь классов, но отличная от ранее рассмотренной. Здесь выделяются следующие внутритрубные роботы: устройства типа PIG, колесные, гусеничные, шагающие, червеподобные,

ввинчивающиеся роботы, а также устройства, упирающиеся в стенки трубы. В качестве примера использования данной классификации в статьях произведено разделение на предложенные категории более сорока существующих конструкций роботов для перемещения по трубам. Также в этих работах предлагается классифицировать роботов, способных преодолевать T-образные сочленения, на две группы: роботов, совершающих управляемое изменение формы своего тела для того, чтобы изменить направление своего движения (так называемые «steering type robots»), и роботов, достигающих изменения направления скорости корпуса за счет изменения скорости вращения части своих колес (предложено называть подобные устройства «differential type robots»). В [5] предложено выделять колесных роботов как основной класс устройств для перемещения по трубопроводам и подразделять их на два подтипа: колесные роботы прямолинейного перемещения, описанные в работах [3, 4, 6–

9], и колесные роботы, совершающие винтовое движение [10]. В публикации [11] предложены три способа классификации внутритрубных роботов: по типу двигателя, принципу движения и типу системы управления, а в работе [12] предлагается подразделять роботов на категории по шести основным признакам: типу используемых контактных элементов, характеру взаимодействия с поверхностью трубы, числу звеньев, принципу движения, расположению и типу приводов.

Проанализировав описанные в работах классификации роботов, перемещающихся по трубам, можно отметить, что каждая из них имеет недостатки, связанные с недостаточной детализа-

цией. Так, например, многозвенные колесные роботы, использующие змееподобный принцип перемещения, не могут быть однозначно отнесены ни к одной из категорий. Также некоторые устройства, имеющие принципиально отличный друг от друга способ действия, могут оказаться в одной категории. Поэтому в данной работе предложено классифицировать таких роботов по целому ряду признаков таким образом, чтобы можно было однозначно определить место каждой конструкции в этой классификации.

Классификационные признаки многозвенных роботов, перемещающихся по трубам. Выделим основные классификационные признаки таких роботов и представим их в виде рис. 1.

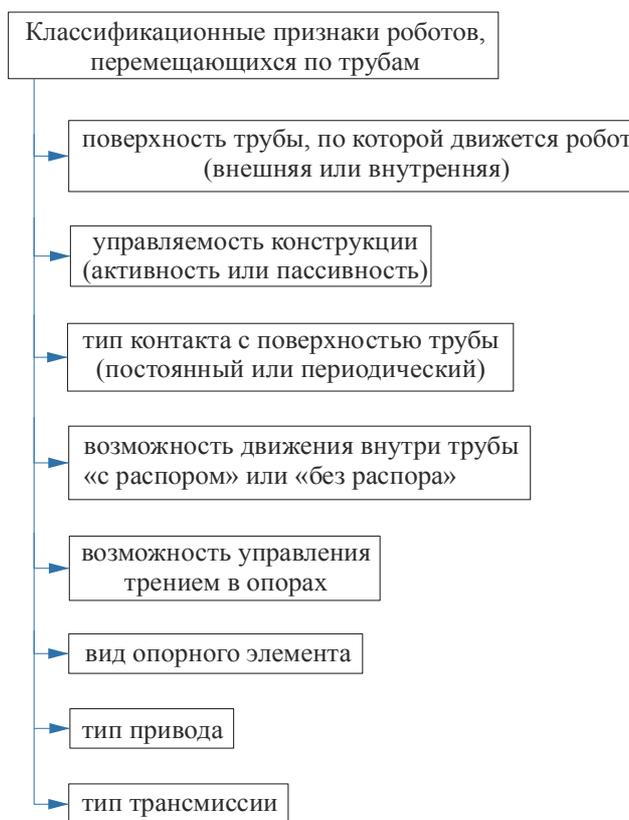


Рис. 1. Классификационные признаки роботов для перемещения по трубам

В качестве пассивных конструкций роботов рассматриваются устройства, не имеющие движителей и переносимые по трубе вместе с потоком жидкости или газа, остальные конструкции роботов считаются активными. Под движением «с распором» понимаем случай, когда робот прикладывает силы к стенкам трубы таким образом, чтобы повысить величины нормальных реакций, действующих на робота со стороны стенок трубы. На схемах будем обозначать движение с распором пометкой «ср», а движение без распора – «бр». Под управлением трением в опорах понимаем наличие у робота механизма, позволяющего изменять величину коэффициента сухого

трения или величину нормальной реакции, приложенной к опоре робота со стороны внутренней поверхности трубы.

Рассмотрим классификации роботов для перемещения по трубам по выделенным классификационным признакам.

Общая классификация роботов, перемещающихся по трубам. На рис. 2 приведена обобщенная классификация, в соответствии с которой роботы разделяются на перемещающихся внутри труб (внутритрубные) и по их внешней поверхности (так называемые «внетрубные» роботы, схема которых приведена на рис. 3, а).

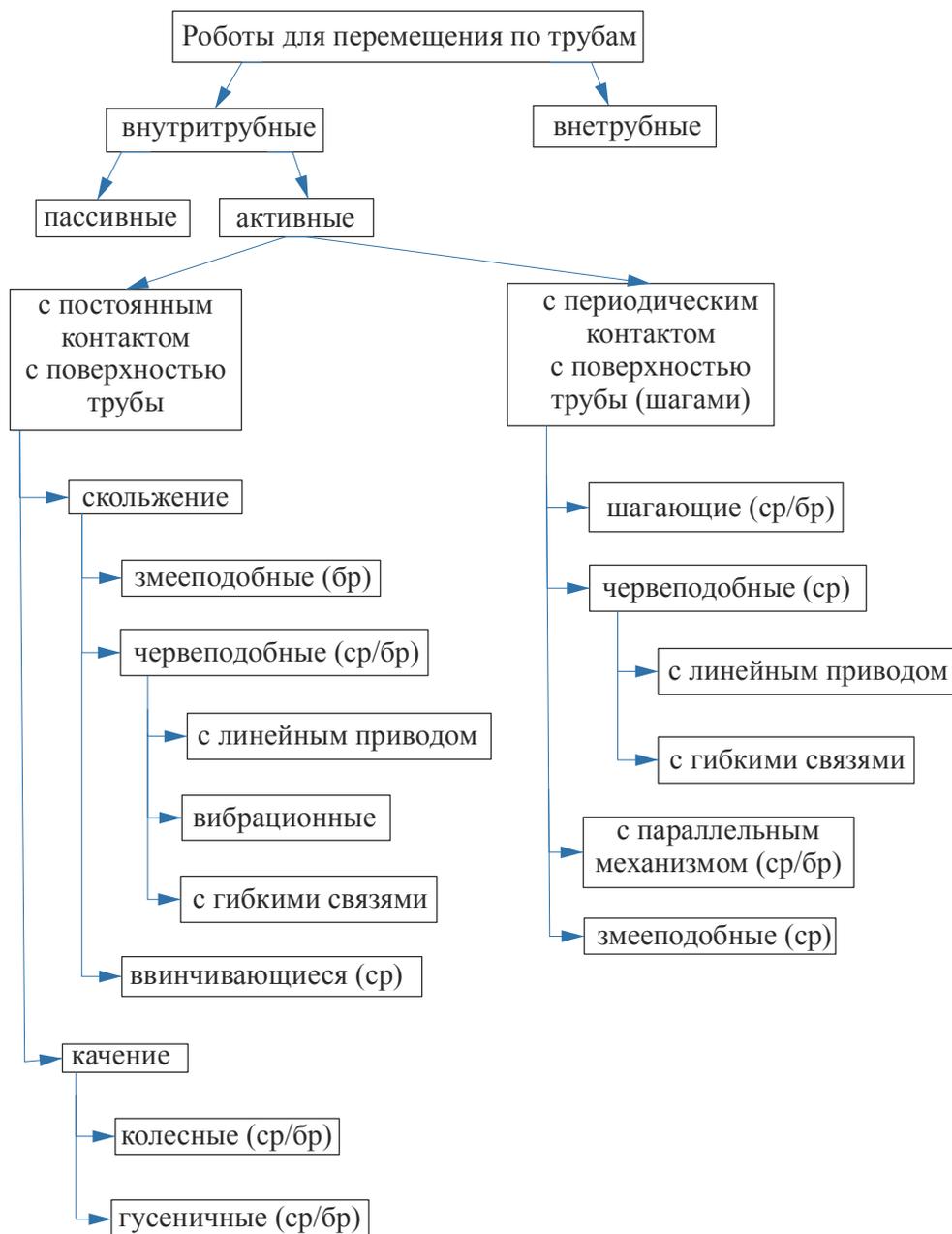


Рис. 2. Обобщенная классификация роботов для перемещения по трубам

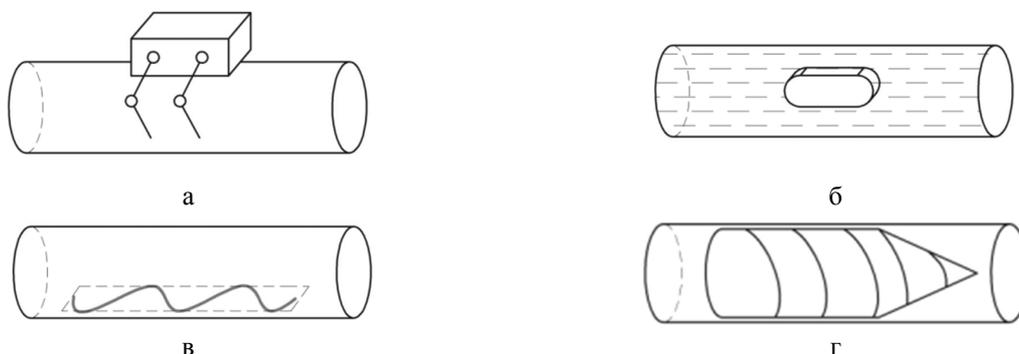


Рис. 3. Схемы роботов для перемещения по трубам: а – внутритрубный, б – внутритрубный пассивный, в – змееподобный (бр), г – ввинчивающийся (ср)

В дальнейшем остановимся только на первом классе роботов – внутритрубных. Эти роботы могут представлять собой пассивные капсулы, переносимые по трубопроводам потоком

жидкости или газа (рис. 3, б). В англоязычной литературе такие устройства называют PIG (от англ. pipeline inspection gauge) [13–15]. Такие роботы не имеют активных двигателей, не могут

управлять своим движением, что можно отнести к их недостаткам. Несмотря на это, такие конструкции активно применяются на практике. Существуют варианты исполнения таких роботов с закрепленными на них инструментами, называемые «instrumented pipeline inspection gauge» (IPIG) [16–18].

Более перспективными представляются активные внутритрубные роботы, которые по способу контакта с поверхностью трубы разделяются на роботов с постоянным контактом и с периодическим контактом. Первые из них передвигаются по поверхности трубы при помощи скольжения или качения опорных элементов или корпуса без отрыва от трубы, вторые периодически отрывают часть опорных элементов от поверхности трубы для их переноса вперед, т.е. перемещаются шагами.

К роботам, движущимся по трубам за счет скольжения, относятся змее- и червеподобные, а также ввинчивающиеся конструкции [19]. Змееподобные роботы могут двигаться, совершая серию синусоидальных волн вдоль направления

движения параллельно поверхности, что позволяет им перемещать свой центр масс поступательно. Существуют и другие способы перемещения таких роботов. Змееподобные роботы располагаются в трубе без распора (рис. 3, в) [20, 21]. Ввинчивающиеся конструкции перемещаются аналогично завинчивающемуся винту, при движении они располагаются в трубе с распором (рис. 3, г).

Червеподобные роботы перемещаются за счет циклического сжатия и растяжения отдельных звеньев конструкции вдоль направления движения, причем звенья могут располагаться в трубе как с распором (рис. 4, г), так и без распора (рис. 4, а-в). В качестве приводов червеподобных роботов, скользящих по поверхности трубы, могут использоваться линейные (рис. 4, а), вибрационные (рис. 4, в, г), а также роботы с гибкими связями (рис. 4, б). Примеры внутритрубных червеподобных роботов можно найти в публикации [22].

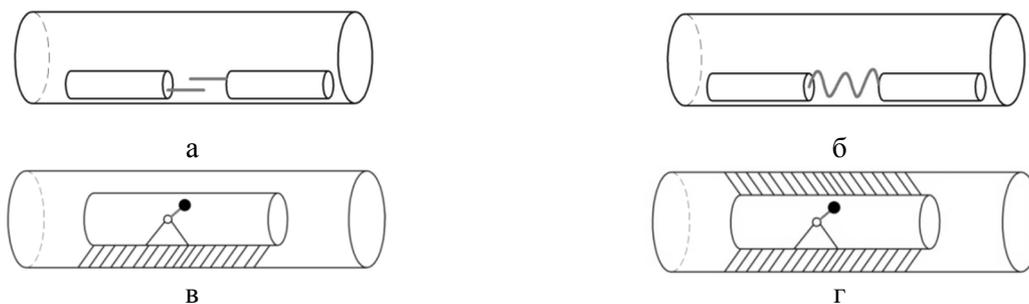


Рис. 4. Схемы внутритрубных червеподобных роботов:
а – с линейным приводом, б – с гибкими связями, в – с вибрационным приводом (бр),
г – с вибрационным приводом (ср)

Внутритрубные роботы с постоянным контактом с поверхностью трубы, обеспечивающимся силами трения качения, перемещаются

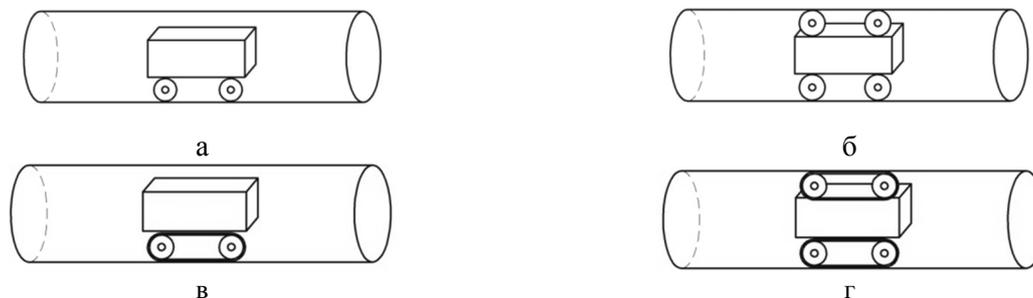


Рис. 5. Схемы внутритрубных роботов с постоянным контактом с поверхностью трубы:
а – колесный (бр), б – колесный (ср), в – гусеничный (бр), г – гусеничный (ср)

роботов, перемещающихся при помощи шагов, можно подразделить на шагающих, червеподобных, змееподобных и роботов с параллельным механизмом [28–32]. При этом шагающие

при помощи колес или гусениц (рис. 5). Причем и те, и другие могут быть расположены в трубе как с распором, так и без распора [23–27].

роботы и роботы с параллельным механизмом могут перемещаться, располагаясь в трубе как с распором, так и без распора (рис. 6).

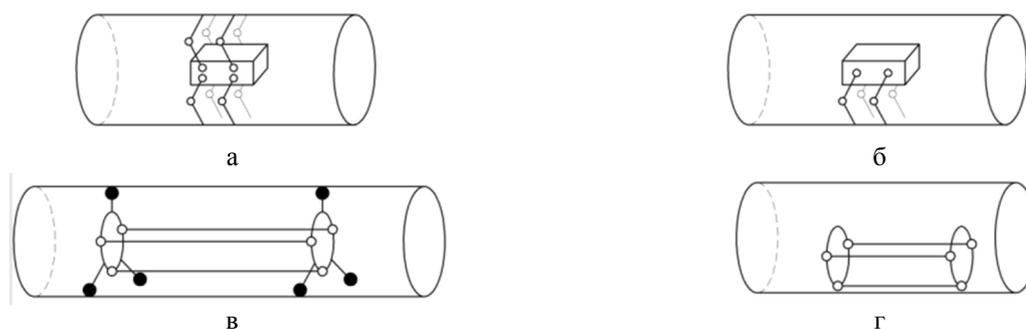


Рис. 6. Схемы роботов, перемещающихся при помощи шагов: а – шагающие (ср), б – шагающие (бр), в – с параллельным механизмом (ср), г – с параллельным механизмом (бр)

Шагающие внутритрубные роботы до недавнего времени довольно редко рассматривались в научной литературе. Наиболее известным примером является TUMmachine [28, 33, 34]. В работе [35] представлен способ управления такими механизмами, учитывающий особенности односторонних механических связей, наложенных на систему в точках контакта с внутренней поверхностью трубы. В работах [36–39] предложены методы генерации последовательностей шагов на внутренней поверхности трубы с учетом необходимости обхода препятствий, а также методы решения обратной задачи кинематики. Возможные

походки таких роботов описаны в публикации [30].

А черве- и змееподобные роботы, движущиеся шагами, всегда располагаются в трубе только с распором (рис. 7). Также отметим, что в червеподобных роботах данного типа в качестве приводов могут использоваться линейные приводы и приводы с гибкими связями, но не вибрационные, как в червеподобных роботах с постоянным контактом опорных элементов с поверхностью трубы.



Рис. 7. Схемы роботов, перемещающихся при помощи шагов: а – червеподобные (ср), б – змееподобные (ср)

Классификация внутритрубных роботов по управлению нормальными реакциями и силой трения. На рис. 8 приведена классификация внутритрубных роботов в зависимости от возможности управления трением между опорными элементами устройства и поверхностью трубы. Под управлением трением будем подразумевать управляемое изменение предельного значения силы трения покоя, приложенной к контактному элементу робота.

Управление трением может быть осуществлено двумя различными способами: за счет управления коэффициентом трения и за счет управления нормальной реакцией. Управление трением позволяет внутритрубным роботам перемещаться при помощи шагов за счет периодической фиксации части опорных элементов и переноса корпуса робота и оставшихся опорных элементов вперед вдоль трубы. Рассмотрим более детально каждый из этих способов.

Управление нормальной реакцией может происходить без деформации поверхности трубы при помощи использования прижимных элемен-

тов, таких как пружины, присоски, электромагниты или за счет примагничивания опоры к поверхности трубы (рис. 9, а). Другой вариант управления нормальной реакцией заключается в деформации поверхности трубы за счет внедрения в нее опорного элемента, например, в форме иглы (рис. 9, б).

Второй вариант управления трением в опорах – управление коэффициентом трения – может быть, как активным, так и пассивным. Активное управление коэффициентом трения возможно за счет использования управляемых опорных элементов, обеспечивающих смену опорных поверхностей, имеющих разный коэффициент трения (рис. 10).

При контакте с трубой опорной поверхностью с малым коэффициентом трения она скользит по поверхности трубы, а в случае контакта опорной поверхностью с большим коэффициентом трения она фиксируется на поверхности трубы. Смена опорных поверхностей обеспечивается специальным приводом устройства.

Пассивное управление коэффициентом трения обеспечивается анизотропией коэффициента

трения в зависимости от направления движения опорного элемента: при движении вперед по

трубе коэффициент трения малый, а при движении назад – большой (рис. 11).

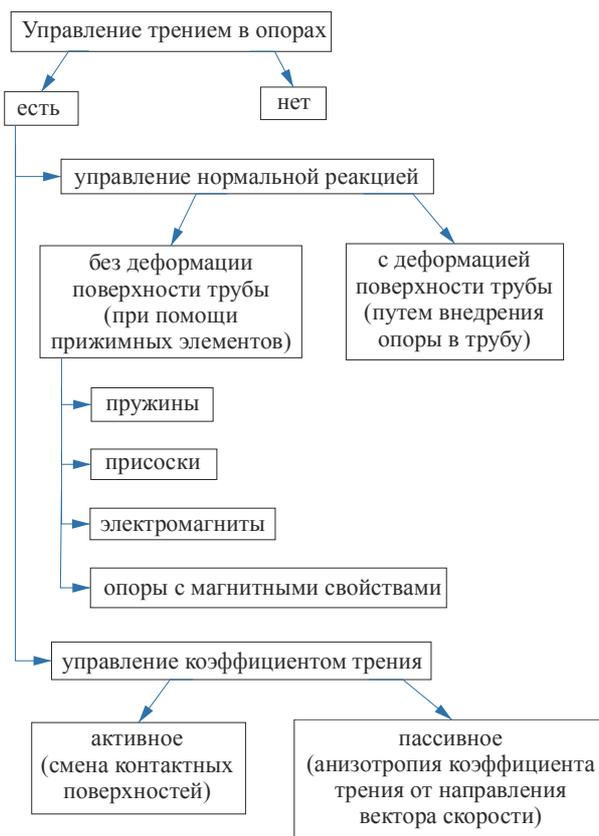


Рис. 8. Классификация внутритрубных роботов по возможности управления трением в опорных элементах



Рис. 9. Опоры внутритрубных роботов с управлением нормальной реакцией: а – за счет прижимного элемента, б – за счет деформации внутренней стенки трубы



Рис. 10. Опоры с активным управлением коэффициентом трения за счет смены опорных поверхностей: а – опора с малым коэффициентом трения, б – опора с большим коэффициентом трения



Рис. 11. Опоры с пассивным управлением коэффициентом трения за счет анизотропии трения: а – малый коэффициент трения, б – большой коэффициент трения, —▶◀— – направление вектора скорости

Классификация внутритрубных роботов по виду опорных элементов. На рис. 12 представлена классификация внутритрубных роботов

по виду опорных элементов, которыми осуществляется контакт с поверхностью трубы.

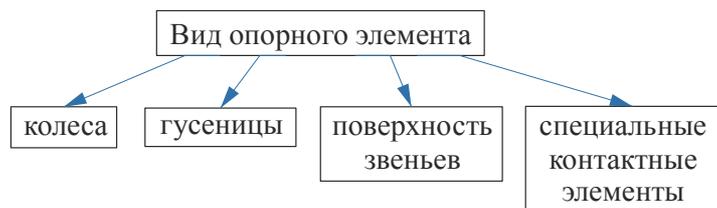


Рис. 12. Классификация внутритрубных роботов по виду опорного элемента

По этому признаку можно выделить четыре вида опор. Наиболее распространенными являются два типа опор: колеса (рис. 5, а,б) и гусеницы (рис. 5, в, г), которые используются в роботах, движущихся при помощи качения по поверхности трубы.

Змееподобные роботы могут контактировать с трубой непосредственно поверхностью звеньев, которые выступают в качестве опорных элементов (рис. 3, в), а вибрационные и червеподобные роботы – поверхностью корпуса (третий тип опор, показанный на рис. 4, а,б).

Четвертый тип опор – это так называемые специальные опоры. К ним можно отнести контактные поверхности ног шагающих роботов

(рис. 6, а, б), опоры с управляемым трением (рис. 9, рис. 10), специальные контактные поверхности звеньев змее- и червеподобных роботов (рис. 7) и т.д.

Классификация внутритрубных роботов по типу привода. Следующим классификационным признаком внутритрубных роботов является тип привода (рис. 13).

Здесь можно выделить роботов, оснащенных электроприводами, пневмоприводами, электромагнитными и пьезоэлектрическими приводами (рис. 14).

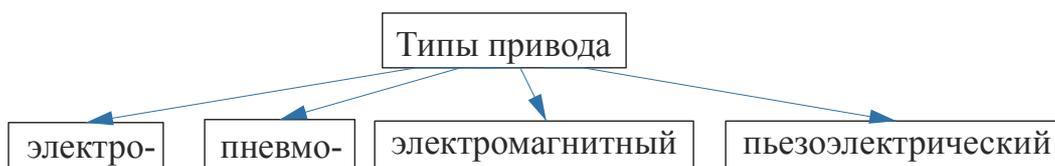


Рис. 13. Классификация внутритрубных роботов по типу привода

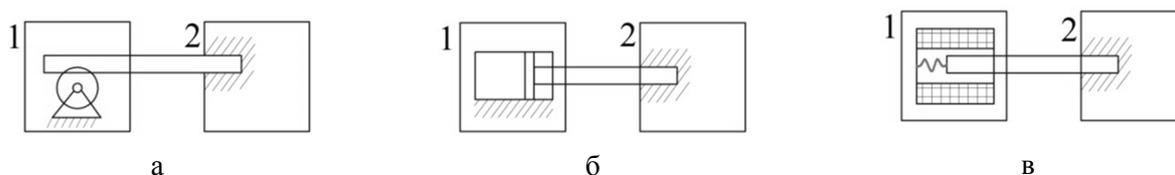


Рис. 14. Типы приводов внутритрубных роботов:

а – электропривод, б – пневмопривод, в – электромагнитный привод, 1 – первое звено, 2 – второе звено

Классификация внутритрубных роботов по типу трансмиссии. Последний из рассматриваемых в работе классификационных признаков – тип трансмиссии внутритрубных роботов, которая может быть жесткой и гибкой (рис. 15).

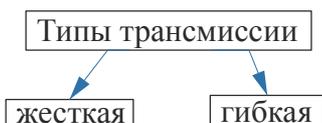


Рис. 15. Классификация внутритрубных роботов по типу трансмиссии

Гибкая трансмиссия используется в роботах, состоящих из нескольких секций, связанных

между собой тросами или нитями, например, в схеме робота, показанного на рис.4, б. Примеры такого рода роботов можно найти в работах [40–42].

Жесткая трансмиссия используется в остальных типах внутритрубных роботов, например, на схемах рис. 4, а, рис. 7, а.

Выводы. В статье представлена общая информация о роботах, перемещающихся по трубам. Предложена детальная классификация таких роботов по восьми различным признакам: поверхность трубы, по которой перемещается робот, управляемость конструкции, тип контакта с поверхностью трубы, движение "с распором" или

нет, возможность управления трением в опорах, вид опорного элемента, типы привода и трансмиссии. Эта классификация позволяет рассмотреть всевозможные конструктивные варианты механизмов передвижения роботов, опорных элементов, а также непосредственно способы перемещения по поверхности трубы, что, в свою очередь, приводит к возможности однозначного определения места каждой конструкции в многообразии трубных роботов, выявлению их особенностей, а значит, установлению круга задач, решаемых тем или иным устройством. Это найдет практическое применение при необходимости обследования и ремонта трубопроводов.

В качестве примеров практического применения предложенной в работе классификации можно рассмотреть следующие. При необходимости визуального обследования длинных прямых горизонтальных трубопроводов целесообразно выбирать колесных и гусеничных роботов в связи с возможностью их быстрого перемещения по сравнению с роботами других типов (движение, реализующее качение, быстрее чем движение со скольжением, а движение с постоянным контактом с опорной поверхностью быстрее движения с периодическим контактом), а также в связи с тем, что они являются активными, скоростью их перемещения можно управлять. Но такие роботы хорошо себя зарекомендуют в пустых трубах без отложений. В противном случае рационально использовать роботов с периодическим контактом с поверхностью трубы, что позволит им обходить загрязнения, отложения и преодолевать существенные по размерам препятствия в трубах. Это могут быть шагающие системы, роботы с параллельными механизмами, а также определенные типы змееподобных и червеподобных роботов. Причем для горизонтальных труб подходят конструкции, которые размещаются как в распор трубы, так и не в распор. В зависимости от выбранного способа перемещения по приведенным в работе классификациям осуществляется выбор трансмиссии, типа привода, вида опорного элемента, а также необходимость управления трением в этом элементе.

Для случая обследования внутритрубными роботами вертикальных труб необходимо выбирать конструкции, которые обязательно располагаются в распор трубы. Обследование изогнутых труб со сложной геометрией и неровными стенками за счет отложений и загрязнений требует использования роботов с периодическим контактом с поверхностью трубы, перемещение при помощи качения или скольжения в данном случае нецелесообразно.

Источник финансирования. Грант Президента Российской Федерации МК-2577.2017.8, договор №14.Z56.17.2577-МК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Young-Sik K., Lee B., Whang I.-C., Kim W.-K., Yi B.-J. A flat pipeline inspection robot with two wheel chains // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Shanghai, China. 2011. Pp. 5141–5146.
2. Schempf H., Mutschler E., Goltsberg V., Skoptsov G., Gavaert A., Vradsis G. Explorer: Untethered real-time gas main assessment robot system // In Proc. of Int. Workshop on Advances in Service Robotics, ASER. 2003. Vol. 3. Pp. 1–4.
3. Roh S., Choi H.R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines // IEEE Transactions on robotics. 2005. Vol. 21. № 1. Pp. 1–7.
4. Roh S. Navigation inside pipelines with differential-drive inpipe robot // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Washington, USA. 2002. Vol. 3. Pp. 2575–2580.
5. Peng L., Ma S., Li B., Wang Y. Design of a mobile mechanism possessing driving ability and detecting function for in-pipe inspection // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Pasadena, California, USA. 2008, Pp. 3992–3997.
6. Choi H.R., Roh S. In-pipe robot with active steering capability for moving inside of pipelines // Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots. 2007. Pp. 376–402.
7. Roh S.G., Ryew S.M., Yang J.H., Choi H.R. Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipelines // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Taipei, Taiwan. 2001. Pp. 761–766.
8. 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 // Intelligent Robot and Systems (IROS): IEEE Int. Conf. 2000. Pp. 1652–1657.
9. Tătar O., Mandru D., Ardelean I. Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks // Mechanika. 2007. Vol. 6. № 68. Pp. 60–64.
10. Mihaita H., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots // Autonomous Systems: Proc. Int. Colloq. Mobile. 2002. Pp. 61–64.
11. Мальчиков А.В. Динамика управляемого движения шестизвездного мобильного внутритрубного робота: дис. ... канд. техн. наук. Курск. 2013. 178 с.
12. Савин С.И. Динамика двухсекционного аппарата с тросовым приводом для перемещения

по трубопроводным системам: дис. ... канд. техн. наук. Курск. 2014. 199 с.

13. U.S. Patent Application, Pipeline inspection gauge extractor /Laymon M.S. 2012. 13/538,760.

14. Mirats Tur J.M., Garthwaite W. Robotic devices for water main in-pipe inspection // A survey. J. of Field Robotics. 2010. Vol. 27. № 4. Pp. 491–508.

15. Nguyen T.T., Kim D.K., Rho Y.W., Kim S.B. Dynamic modeling and its analysis for PIG flow through curved section in natural gas pipeline // Computational Intelligence in Robotics and Automation: IEEE International Symposium, Banff, Alberta, Canada. 2001. Pp. 492–497.

16. Keshwani R., Bhattacharya S. Design and optimization of eddy current sensor for instrumented pipeline inspection gauge // Sensor Review. 2008. Vol. 28. № 4. Pp. 321–325.

17. Pre-commissioning Pig (pipeline inspection gauge) [Электронный ресурс]. <https://www.nordstream.com/press-info/images/pre-commissioning-pig-pipeline-inspection-gauge-2718/>.

18. Pigs in the pipes [Электронный ресурс]. <https://www.theengineer.co.uk/issues/november-2013-online/pigs-in-the-pipes/>.

19. Wright C., Johnson A., Peck A., McCord Z., Naaktgeboren A., Gianfortoni P., Gonzalez-Rivero M., Hatton R., Choset H. Design of a modular snake robot // Intelligent Robots and Systems (IROS): IEEE/RSJ International Conference, San Diego, USA. 2007. Pp. 2609–614.

20. Baba T., Kameyama Y., Kamegawa T., Gofuku, A. A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion // SICE Annual Conference: IEEE, Taipei, Taiwan. 2010. Pp. 2319–2325.

21. Melo K., Paez, L. Modular snake robot gaits on horizontal pipes // Intelligent Robots and Systems (IROS): IEEE/RSJ International Conference, Vilamoura, Portugal. 2012. Pp. 3099–3104.

22. Bertetto A.M., Ruggiu M. In-pipe inchworm pneumatic flexible robot // Advanced Intelligent Mechatronics: IEEE/ASME International Conference, Como, Italy. 2001. Vol. 2. Pp. 1226–1231.

23. Roh S.G., Choi H.R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines // IEEE transactions on robotics. 2005. Vol. 21. № 1. Pp. 1–17.

24. Horodincu M., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots // International Colloquium on Autonomous and Mobile Systems, Germany. 2001. Pp. 61–64.

25. Jun C., Deng Z., Jiang S. Study of locomotion control characteristics for six wheels driven in-pipe robot // Robotics and Biomimetics (ROBIO): IEEE International Conference, USA. 2004. Pp. 119–124.

26. Choi H.R., Roh S.G. In-pipe robot with active steering capability for moving inside of pipelines // Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots. 2007. Pp. 375–402.

27. Roh S.G., Ryew S., Yang J.H., Choi H.R. Actively steerable in-pipe inspection robots for underground urban gas pipelines // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Seoul, Korea. 2001. Vol. 1. Pp. 761–766.

28. Gálvez J.A., De Santos P.G., Pfeiffer F. Intrinsic tactile sensing for the optimization of force distribution in a pipe crawling robot // IEEE/ASME Transactions on mechatronics. 2001. Vol. 6. №1. Pp. 26–35.

29. Silva M.F., Tenreiro Machado J.A. A historical perspective of legged robots // Vibration and Control. 2007. Vol. 13. № 9-10. Pp. 1447–1486.

30. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Ворочаев А.В. Классификация режимов движения четырехногого плоского внутритрубного робота // Cloudofscience. 2017. Т. 4. № 2. С. 224–248.

31. Казарян К.Г., Савин С.И. Варианты конструкции робота для перемещения по полостям // Молодежь и XXI Век, Курск, 2012. С. 199.

32. Казарян К.Г., Савин С.И. Робот с параллельной структурой для исследования трубопроводных систем // Молодежь и XXI Век, Курск. 2012. С. 203.

33. Zagler A., Pfeiffer F. "MORITZ" a pipe crawler for tube junctions // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Taipei, Taiwan. 2003. Vol. 3. P. 2954–2959.

34. Pfeiffer F., Eltze J., Weidemann H.J. The TUM-walking machine // Intelligent Automation & Soft Computing. 1995. Vol. 1. № 3. Pp. 307–323.

35. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): International Conference, Saint-Petersburg, Russia, 2017. P. 1–6.

36. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Ворочаев А.В. Моделирование движения четырехногого шагающего робота в трубопроводах с изменяющимся диаметром и изгибами // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 1 (321). С. 39–46.

37. Savin S., Vorochaeva L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes // Control and Communications (SIBCON): IEEE International Siberian Conference, Astana, Kazakhstan. 2017. Pp. 1–6.

38. Savin S., Vorochaeva L. Pace pattern generation for an pipeline robot // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): International Conference, Saint-Petersburg, Russia. 2017. Pp. 1–6.

39. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Ворочаев А.В. Алгоритм генерации походок для робота, осуществляющего движение в трубопроводах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7. № 1 (22). С. 90–97.

40. Савин С.И., Яцун С.Ф., Рублёв С.Б. Экспериментальные исследования управляемого движения робота с внешними актуаторами для мониторинга трубопроводов малого диаметра // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4-5. С. 1277–1279.

Информация об авторах

Ворочаева Людмила Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.

E-mail: mila180888@yandex.ru.

Юго-Западный государственный университет,
Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Савин Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.

E-mail: sergey89mkgtu@mail.ru.

Юго-Западный государственный университет,
Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Поступила в феврале 2018 г.

© Ворочаева Л.Ю., Савин С.И., 2018

L.Yu. Vorochaeva, S.I. Savin

CRITERIA FOR CLASSIFICATION OF IN-PIPE ROBOTS

In-pipe robots are developed for solving a diverse set of tasks, all of which have to do with monitoring and repairs of pipelines. These tasks include generation of maps of pipelines, detecting defects, anomalies and matter deposits on the inner surface of the pipe, studying the inner surface of the pipe in order to determine if it needs to be repaired and if it is possible to repair it, gathering information on the properties of the inner surface of the pipe and studying the change of these properties. These tasks have practical significance and their automation with robots is economically beneficial. Considering the variety of the existing in-pipe robot designs, it is important to have a way to categorize them and have a clear understanding which tasks are suitable for particular in-pipe robots. To this end, the detailed classifications of in-pipe robots can be used. This paper presents a survey of classifications of in-pipe robots. The previously proposed criteria for such classifications are discussed. The ambiguity of the commonly used classifications is highlighted. The paper presents a more detailed classification, based on eight criteria: 1) types of pipe surfaces that a robot can interact with, 2) controllability of a robot (distinguishing fully passive and active robots), 3) type of contact interaction with the inner surface of the pipe, 4) controllability of normal reactions and 5) controllability of friction forces in contact points or surfaces, 6) contact element types, 7) motor type, 8) transmission type. Combination of these criteria allows highlighting particular features of the existing in-pipe robot designs, simplifying the analysis of problem range that the robot can solve.

Keywords: *in-pipe robots, classification criteria, contact interaction type, controllable friction, contact element type, motor type, transmission type.*

REFERENCES

1. Young-Sik K., Lee B., Whang I.-C., Kim W.-K., Yi B.-J. A flat pipeline inspection robot with two wheel chains // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Shanghai, China, 2011, pp. 5141–5146.

41. Jatsun S., Yatsun A., Savin S. Pipe inspection parallel-link robot with flexible structure // Adaptive Mobile Robotics: 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR, Baltimore, USA. 2012. P. 713–719.

42. Яцун С.Ф., Савин С.И. Экспериментальные исследования вертикального перемещения робота для мониторинга трубопроводных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №5 (44). Ч.2. С. 199–202.

2. Schempf H., Mutschler E., Goltsberg V., Skoptsov G., Gavaert A., Vradis G. Explorer: Untethered real-time gas main assessment robot system // In Proc. of Int. Workshop on Advances in Service Robotics, ASER, 2003, vol. 3, pp. 1–4.

3. Roh S., Choi H.R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines // IEEE

Transactions on robotics, 2005, vol. 21, no. 1, pp. 1–7.

4. Roh S. Navigation inside pipelines with differential-drive inpipe robot // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Washington, USA, 2002, vol. 3, pp. 2575–2580.

5. Peng L., Ma S., Li B., Wang Y. Design of a mobile mechanism possessing driving ability and detecting function for in-pipe inspection // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Pasadena, California, USA, 2008, pp. 3992–3997.

6. Choi H.R., Roh S. In-pipe robot with active steering capability for moving inside of pipelines // Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots, 2007, pp. 376–402.

7. Roh S.G., Ryew S.M., Yang J.H., Choi H.R. Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipelines // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Taipei, Taiwan, 2001, pp. 761–766.

8. 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 // Intelligent Robot and Systems (IROS): IEEE Int. Conf., 2000, pp. 1652–1657.

9. Tătar O., Mandru D., Ardelean I. Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks // Mechanika, 2007, vol. 6, no. 68, pp. 60–64.

10. Mihaita H., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots // Autonomous Systems: Proc. Int. Colloq. Mobile, 2002, pp. 61–64.

11. Malchikov A.V. Dynamics of controlled motion of a six-link mobile in-pipe robot: dis. ... kand. tech. sciences. Kursk, 2013, 178 p.

12. Savin S.I. Dynamics of two-section apparatus with cable drive for moving through pipeline systems: dis. ... kand. tech. sciences. Kursk, 2014, 199 p.

13. U.S. Patent Application, Pipeline inspection gauge extractor / Laymon M.S., 2012, 13/538,760.

14. Mirats Tur J.M., Garthwaite W. Robotic devices for water main in-pipe inspection // A survey. J. of Field Robotics, 2010, vol. 27, no. 4, pp. 491–508.

15. Nguyen T.T., Kim D.K., Rho Y.W., Kim S.B. Dynamic modeling and its analysis for PIG flow through curved section in natural gas pipeline // Computational Intelligence in Robotics and Automation: IEEE International Symposium, Banff, Alberta, Canada, 2001, pp. 492–497.

16. Keshwani R., Bhattacharya S. Design and optimization of eddy current sensor for instrumented pipeline inspection gauge // Sensor Review, 2008, vol. 28, no. 4, pp. 321–325.

17. Pre-commissioning Pig (pipeline inspection gauge) [Electronic resource]. <https://www.nordstream.com/press-info/images/pre-commissioning-pig-pipeline-inspection-gauge-2718/>.

18. Pigs in the pipes [Electronic resource]. <https://www.theengineer.co.uk/issues/november-2013-online/pigs-in-the-pipes/>.

19. Wright C., Johnson A., Peck A., McCord Z., Naaktgeboren A., Gianfortoni P., Gonzalez-Rivero M., Hatton R., Choset H. Design of a modular snake robot // Intelligent Robots and Systems (IROS): IEEE/RSJ International Conference, San Diego, USA, 2007, pp. 2609–2614.

20. Baba T., Kameyama Y., Kamegawa T., Gofuku A. A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion // SICE Annual Conference: IEEE, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 2319–2325.

21. Melo K., Paez L. Modular snake robot gaits on horizontal pipes // Intelligent Robots and Systems (IROS): IEEE/RSJ International Conference, Vilamoura, Portugal, 2012, pp. 3099–3104.

22. Bertetto A.M., Ruggiu M. In-pipe inchworm pneumatic flexible robot // Advanced Intelligent Mechatronics: IEEE/ASME International Conference, Como, Italy, 2001, vol. 2, pp. 1226–1231.

23. 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.

24. Horodincea M., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots // International Colloquium on Autonomous and Mobile Systems, Germany, 2001, pp. 61–64.

25. Jun C., Deng Z., Jiang S. Study of locomotion control characteristics for six wheels driven in-pipe robot // Robotics and Biomimetics (ROBIO): IEEE International Conference, USA, 2004, pp. 119–124.

26. Choi H.R., Roh S.G. In-pipe robot with active steering capability for moving inside of pipelines // Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots, 2007, pp. 375–402.

27. Roh S.G., Ryew S., Yang J.H., Choi H.R. Actively steerable in-pipe inspection robots for underground urban gas pipelines // Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference, Seoul, Korea, 2001, vol. 1, pp. 761–766.

28. Gálvez J.A., De Santos P.G., Pfeiffer F. Intrinsic tactile sensing for the optimization of force distribution in a pipe crawling robot // IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 2001, vol. 6, no. 1, pp. 26–35.

29. Silva M.F., Tenreiro Machado J.A. A historical perspective of legged robots // Vibration and Control, 2007, vol. 13, no. 9–10, pp. 1447–1486.

30. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Vorochaev A.V. Classification of locomotion regimes of a planar four-legged in-pipe robot // *Cloud of science*, 2017, vol. 4, no. 2. pp. 224–248.
31. Kazaryan K.G., Savin S.I. Design options the robot to move through the cavities // *Youth and the XXI Century*, Kursk, 2012, pp. 199.
32. Kazaryan K.G., Savin S.I. Robot with parallel structure for the study of piping systems // *Youth and the XXI Century*, Kursk, 2012, pp. 203.
33. Zagler A., Pfeiffer F. "MORITZ" a pipe crawler for tube junctions // *Robotics and Automation (ICRA): IEEE International Conference*, Taipei, Taiwan, 2003, vol. 3, pp. 2954–2959.
34. Pfeiffer F., Eltze J., Weidemann H.J. The TUM-walking machine // *Intelligent Automation & Soft Computing*, 1995, vol. 1, no. 3, pp. 307-323.
35. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): International Conference*, Saint-Petersburg, Russia, 2017, pp. 1–6.
36. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Vorochaev A.V. Modelling of the movement quadruped walking robot in pipelines with the changing diameter and bends // *Fundamental and Applied Problems of Technics and technology*, 2017, no. 1 (321), pp. 39–46.
37. Savin S., Vorochaeva L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes // *Control and Communications (SIBCON): IEEE International Siberian Conference*, Astana, Kazakhstan, 2017, pp. 1–6.
38. Savin S., Vorochaeva L. Pace pattern generation for an pipeline robot // *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): International Conference*, Saint-Petersburg, Russia, 2017, pp. 1–6.
39. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Vorochaev A.V. Algorithm to generate gaits for robots moving in pipelines // *Proceedings of the South-West State University. Series Engineering and Technology*, 2017, vol. 7, no. 1 (22), pp. 90–97.
40. Savin S.I., Jatsun S.F., Rublev S.B. Experimental researches of operated movement at robot with external actuators for monitoring the small diameter pipelines // *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4-5, pp. 1277–1279.
41. Jatsun S., Yatsun A., Savin S. Pipe inspection parallel-link robot with flexible structure // *Adaptive Mobile Robotics: 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR*, Baltimore, USA, 2012, pp. 713–719.
42. Jatsun S.F., Savin S.I. Studying of the vertical movements of an in-pipe inspection robot // *Proceedings of the South-West State University*, 2012, vol. 5 (44), no. 2, pp. 199–202.

Information about the author

Lyudmila Y. Vorochaeva, PhD, Assistant professor.

E-mail: mila180888@yandex.ru.

South-West State University.

Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Sergey I. Savin, PhD, Assistant professor.

E-mail: sergey89mkgtu@mail.ru.

South-West State University.

Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Received in February 2018