

Технология и технологические машины

УДК 621.865.8

Система управления миниатюрным внутритрубным роботом

С.А. Воротников¹, Н.И. Никитин¹, М. Чекарелли²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² Лаборатории робототехники и мехатроники (ЛАРМ) в Университете Кассино в г. Кассино (Италия)

Control System for a Miniature In-Tube Robot

S.A. Vorotnikov¹, N.I. Nikitin¹, M. Ceccarelli²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Laboratory of Robotics and Mechatronics (LARM), University of Cassino, Cassino (Italy).



e-mail: vorotn@bmstu.ru

i Описан вариант построения конструкции и системы управления миниатюрного внутритрубного робота (МВР), предназначенного для диагностики и местного ремонта внутренних поверхностей произвольно ориентированных труб диаметром 50 мм. Предложена конструкция МВР в виде трех модулей: базового, связанного с оператором, выносного — предназначенного для ретрансляции команд управления транспортно-манипуляционным устройством (ТМУ) и собственно ТМУ, осуществляющего диагностику, а также локальный ремонт трубопровода с помощью специализированного оборудования. Перемещение ТМУ реализуется червячным способом, при этом внутритрубное пространство в процессе движения ТМУ подсвечивается. С учетом специфики перемещения МВР предложено строить его систему управления на основе нечеткого контроллера, при этом в качестве входных данных использовать уровень освещенности и текущее положение ТМУ, а в качестве выходных — значения линейной и угловой скорости его движения. Для проверки алгоритма нечеткого вывода было проведено его математическое моделирование, а также выполнен натурный эксперимент, имитирующий движение макета ТМУ внутри трубопровода.

Ключевые слова: миниатюрный внутритрубный робот, модульная конструкция, транспортно-манипуляционное устройство, система управления, нечеткий контроллер.

i The article describes a way to design the structure and control system of a miniature in-tube robot (MIR) that is used for diagnostics and local repair of inner surfaces of arbitrary oriented tubes of 50 mm diameter. It is suggested that the MIR structure consist of three modules: the base one that is connected with an operator, the remote one that is used for re-translation of the operator's commands to control the transportation and handling device (THD) and the THD proper that is responsible for movement, diagnostics, and local repair of the tubes using specialized equipment. The THD moves using caterpillar tracks; and the in-tube space is illuminated during the process. Considering the peculiarities of the MIR movement, it is proposed to build its control system using a fuzzy-logic controller where the illumination level and THD current position are used as entry data, and the values of THD

linear and rotational speeds as output data. Mathematic modelling and a full-scale experiment involving moving a mock-up THD inside a tube have been carried out to test the fuzzy logic algorithm.

Keywords: miniature in-tube robot, modular architecture, transportation and handling device, control system, fuzzy-logic controller.

В последние годы в робототехнике развивается новое направление исследований — создание миниатюрных мобильных роботов, предназначенных для движения и выполнения различных задач в ограниченном пространстве. Примером такого пространства являются трубопроводы малого диаметра (от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров).

Если для движения в трубах большого диаметра создано немало мобильных роботов, то для выполнения операций в трубах малого диаметра разработки находятся в начальной стадии. Такие работы актуальны, поскольку есть необходимость повысить эффективность систем технической диагностики трубопроводов малого диаметра производственных объектов.

Анализ разработок в области миниатюрной внутритрубной робототехники. Принципы движения миниатюрных роботов и особенности реализующих их механических систем определяются назначением роботов, средой, в которой происходит движение, требованиями к выполнению поставленной задачи и условиями движения. Рабочими средами могут быть воздух, вода, вязкие и горючие жидкости и т. п. К миниатюрным относят роботов, предназначенных для движения внутри каналов диаметром 5...30 мм [1–5]. Такое сечение имеют, в частности, трубопроводные системы жилых зданий (диаметр 15, 20 и 32 мм) и промышленных объектов.

Сформулируем основные требования, которым должен отвечать миниатюрный внутритрубный робот (МВР):

- возможность совершать движения в прямом и обратном направлениях;
- возможность перемещаться по вертикальным и наклонным участкам;
- возможность остановки в любой точке траектории с удержанием собственно массы и массы полезной нагрузки без «соскальзывания» (на вертикальных участках);
- возможность проходить искривленные участки радиусом $R > 50D$, где D — внутренний диаметр канала;
- наличие механизма эвакуации в случае поломки.

Дополнительным требованием, которое усложняет конструкцию МВР, является необходимость преодоления искривленных участков радиусом $R < 10D$, а также Т-, Г- или Х-образных ответвлений при возможности изменять направление движения. Управление миниатюрным роботом должно быть как автономным, так и ручным, при этом следует учитывать возможность его эвакуации в случае поломки.

По типу механизма перемещения известные подвижные внутритрубные устройства можно классифицировать следующим образом: пассивно перемещающиеся вследствие давления жидкости или газа внутри замкнутого объема; колесные; гусеничные; штыревые; шагающие; червячные; винтовые (рис. 1) [2].

Анализ, проведенный авторами, показал, что для трубопроводов малого диаметра предпочтительно использовать МВР с механизмом перемещения червячного типа. Активную (подвижную) часть такого робота предложено строить в виде транспортно-манипуляционного устройства (ТМУ) модульной конструкции, где в требуемом порядке сопрягаются *тяговые* (совершающие заданные перемещения), *информационный* (содержащий электронику, включая средства диагностики), а также, при необходимости, *ремонтный* модули (рис. 2) [3].

В состав тяговых модулей, в свою очередь, входят *модули линейного перемещения* (обеспечивают необходимое изменение линейного размера звена), *модули фиксации* (обеспечивают удерживание конструкции при изменении линейного размера другого модуля) и *модули поворота* (обеспечивают поворот информационного модуля).

Рассмотрим принцип движения МВР с ТМУ, состоящим из трех тяговых модулей — двух модулей фиксации и одного модуля линейного перемещения (рис. 3).

Модули фиксации имеют два положения — соприкосновение с поверхностью трубы и свободное положение (без соприкосновения). Модуль линейного перемещения работает в осевом направлении и позволяет роботу двигаться в этом направлении. На рис. 3 показаны циклы движения ТМУ по прямолинейному (рис. 3, а) и изогнутому (рис. 3, б) участкам трубы.

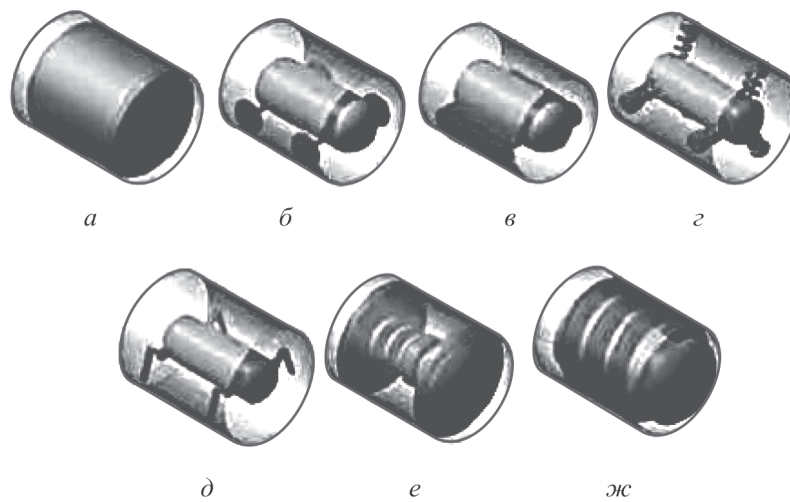


Рис. 1. Конструктивные схемы подвижных внутритрубных устройств: а — пассивные; б — колесные; в — гусеничные; г — штыревые; д — шагающие; е — червячные; ж — винтовые

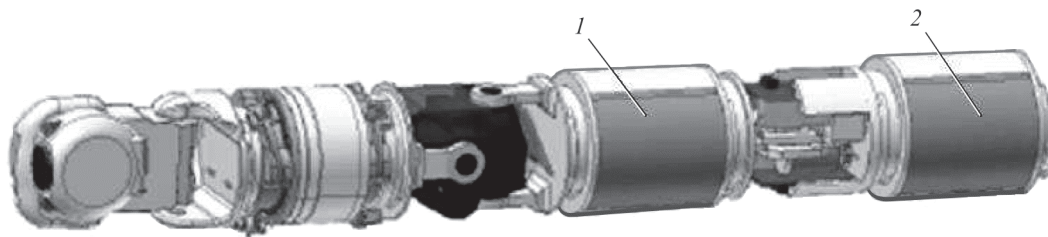


Рис. 2. Модульная схема ТМУ червячного типа: 1 — информационный модуль; 2 — тяговый модуль

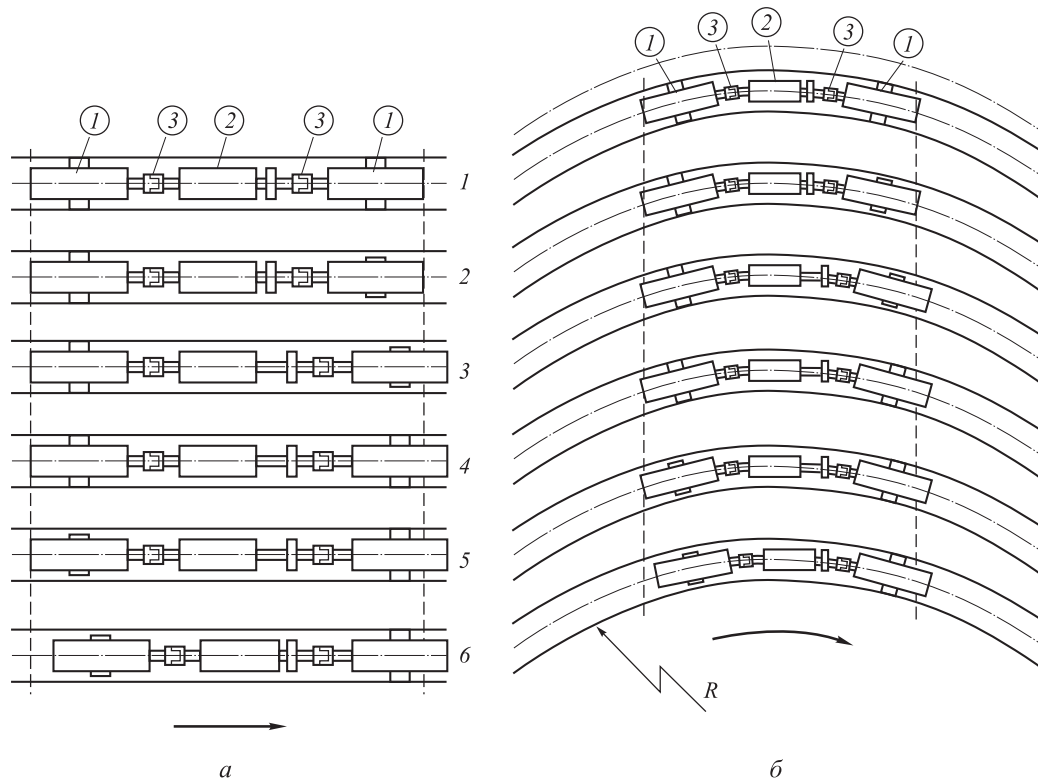


Рис. 3. Схема работы модулей при перемещении ТМУ внутри трубы: а — на прямолинейном участке; б — на изогнутом участке (модули ТМУ: ① — фиксации; ② — линейного перемещения; ③ — поворота; 1-6 — фазы перемещений)

Движение робота вправо начинается с того, что оба модуля фиксации упираются в трубу (фаза 1), затем передний модуль фиксации сжимается (фаза 2). Далее модуль линейного перемещения растягивается (фаза 3), перемещая передний модуль фиксации вправо, который, расширяясь, упирается в трубу (фаза 4), затем задний модуль фиксации сжимается (фаза 5). После этого модуль линейного перемещения сжимается, т. е. перемещает задний модуль фиксации вправо (фаза 6). Наконец, задний модуль фиксации, расширяясь, упирается в стенку трубы (фаза 1). Таким образом, вся система сдвигается вправо. Аналогично происходит движение влево.

Анализ публикаций о методах и средствах контроля трубопроводов для промышленных предприятий и жилых комплексов показывает, что об остаточном ресурсе трубопровода судят по толщине его стенки и уровню напряжений в конкретных местах трубопровода [6–9]. Именно локальные дефекты, в том числе вызываемые коррозией, являются главной причиной разрушения трубопровода. Эти дефекты чаще всего возникают в местах отводов и тройников (т. е. в области Т-, Г- или Х-образных ответвлений трубы). В связи с этим необходимо не только выбрать соответствующую кинематическую схему МВР и его транспортных модулей, но и обеспечить высокую точность позиционирования информационного и ремонтного модулей относительно трубопровода в процессе движения.

Система управления и конструктивная схема МВР. Систему управления МВР для проведения контроля и местного ремонта дефектов внутренней поверхности трубопровода можно представить в виде структуры (рис. 4).

Логически она разделяется на два уровня: верхний и нижний [3]. Верхний уровень включает следующие блоки:

- *базовый модуль управления*, отвечающий за обработку телеметрических данных о состоянии трубы и местоположении ТМУ и отображение этой информации в наглядном виде на пульте управления оператора, а также за передачу команд управления с этого пульта на контроллер верхнего уровня;

- *выносной модуль управления*, содержащий в своем составе контроллер верхнего уровня и транслирующий команды управления от оператора на ТМУ, а также телеметрические данные с датчиков на базовый модуль управления. В его задачи входит логическое управление движением ТМУ, основанное на использовании средств нечеткой логики и алгоритмов сетей Петри [10, 11];

- *выносной модуль линейного перемещения*, отвечающий за синхронную подачу кабеля и помощь в передвижении ТМУ.

Нижний уровень управления МВР — его исполнительный механизм — представляет собой ТМУ, перемещающееся непосредственно в трубе [3]. Конструктивно оно содержит три тяговых модуля (осуществляющих фиксацию, ли-



Рис. 4. Структура системы управления МВР

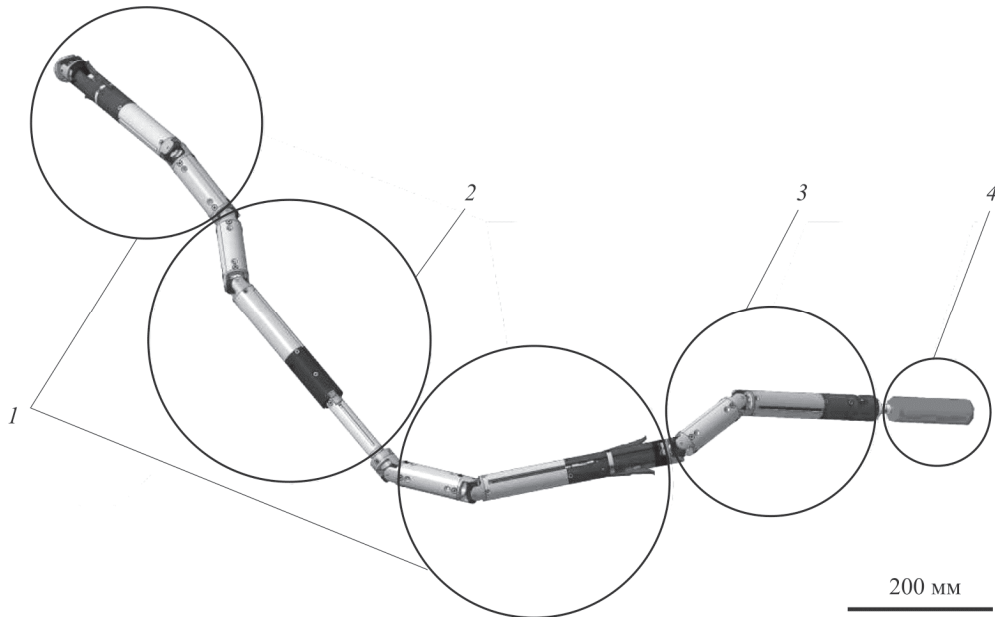


Рис. 5. Вид ТМУ МВР:

1 — модуль фиксации; 2 — модуль линейного перемещения; 3 — модуль поворота; 4 — информационный модуль

нейное перемещение и поворот) и информационный модуль с диагностической аппаратурой [7–9] (рис. 5). Длина модулей 150...250 мм, диаметр 30...50 мм.

Алгоритм управления МВР. Как уже отмечалось, тяговые модули должны обеспечивать высокую точность позиционирования всей конструкции ТМУ относительно трубопровода в процессе движения, а информационные — находить дефект внутренней стенки трубы. Для достижения этого в состав информационного модуля включены вихретоковый датчик [7], телекамера [8], источник света и датчик освещенности (эти устройства расположены в головной части ТМУ). В процессе перемещения по трубопроводу МВР освещает пространство впереди себя, а датчик освещенности определяет интегральную освещенность окружающего пространства, обусловленную отражением светового потока от стенок трубы. Освещенность будет приблизительно постоянной до того момента, пока в «поле видимости» не попадет ответвление трубы или ее поворот. Данные с телекамеры позволят различить эти случаи. В такой схеме невозможно точно определить закономерности изменения освещенности, поэтому при построении алгоритма управления некоторые авторы предлагают использовать аппарат нечеткой логики [12].

Воспользуемся этим подходом. В качестве нечетких входных данных выберем уровень освещенности L , разность $\Delta\varphi$ угловых положе-

ний информационного модуля и ответвления трубы, а также значение проскальзывания, полученное с помощью датчика проскальзывания, установленного в информационном модуле.

Выходными данными контроллера нечеткой логики будем считать значение линейной скорости V перемещения ТМУ и угловой скорости ω перемещения информационного модуля. Для отладки алгоритма управления проведем моделирование движения ТМУ в среде MATLAB (рис. 6).

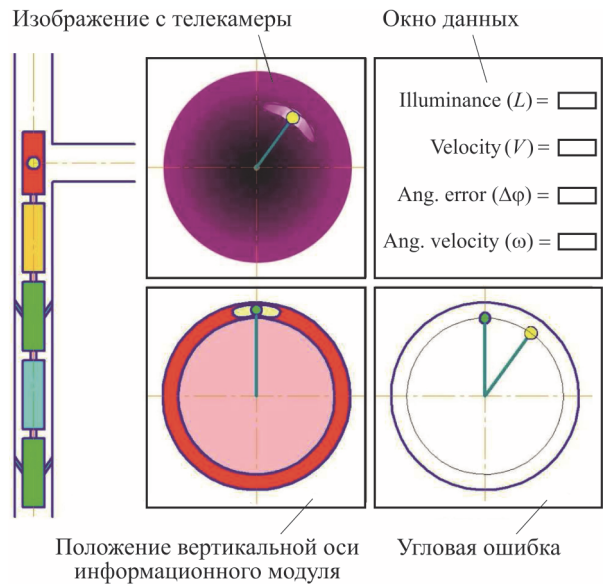


Рис. 6. Интерфейс программы моделирования движения

Моделирование показало, что в соответствии с расстоянием от головной части ТМУ до места отвода трубопровода изменяется размер «засвета» (фрагмент серповидной формы на рис. 6), получаемого на изображении с телекамеры. Это обусловлено изменением общей освещенности, вызванным изменением площади отражающей поверхности.

Последовательность действий алгоритма нечеткого вывода приведена на рис. 7. В соответствии с рис. 7, а измеренное значение освещенности подается на вход нечеткого контроллера, который выдает значение линейной скорости ТМУ. По мере перемещения ТМУ с этой скоростью происходит новое измерение значения освещенности, которое вновь подается на вход нечеткого контроллера, и т. д. Таким образом, по мере движения устройства вверх по трубе, т. е. его приближения к отводу, уровень освещенности возрастает и скорость ТМУ уменьшается.

Изображение с телекамеры позволяет опре-

делить угловую ошибку $\Delta\varphi$ между направлением отвода трубопровода и текущим положением ТМУ. В соответствии с алгоритмом (рис. 7, б) измеренное значение угловой ошибки подается на вход нечеткого контроллера, который выдает значение угловой скорости ω для корректировки этой ошибки. По мере осуществления поворота с этой скоростью вычисляется новое значение угловой ошибки, которое вновь подается на вход нечеткого контроллера, и т. д. Таким образом, по мере приближения ТМУ к отводу его угловое положение выравнивается по отношению к угловому положению отвода.

Результаты, полученные при моделировании, представлены на рис. 8.

На рис. 8, а, б видно, что зависимости выходной переменной (скорости перемещения ТМУ) от входных переменных (уровня освещенности, значения проскальзывания и угла поворота) являются достаточно гладкими. Отсюда следует, что нечеткий контроллер будет выдавать значения линейной и угловой скорости

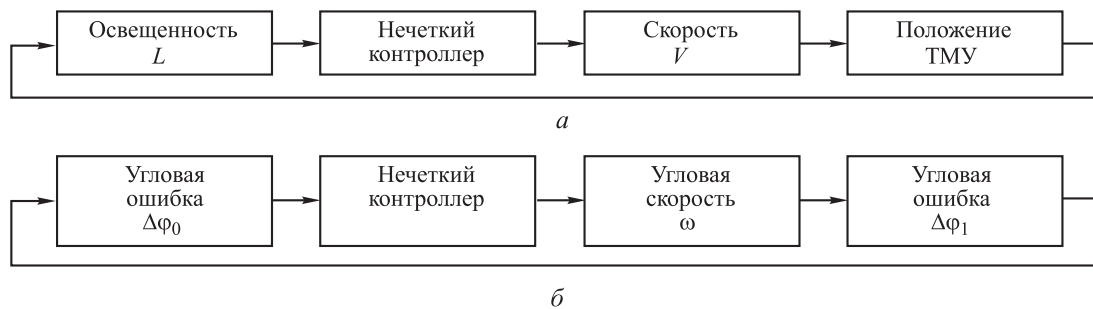
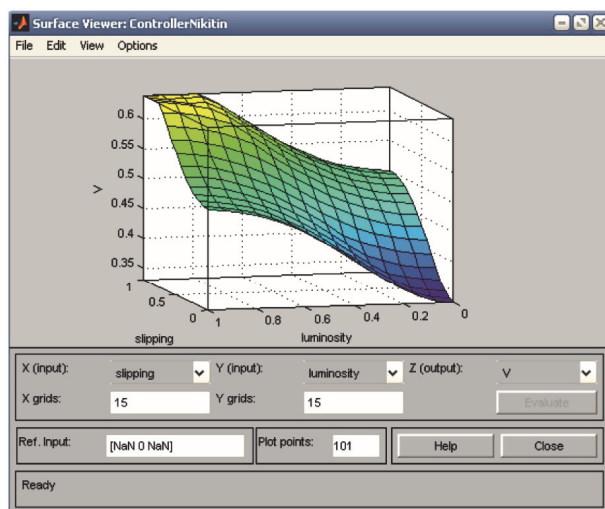
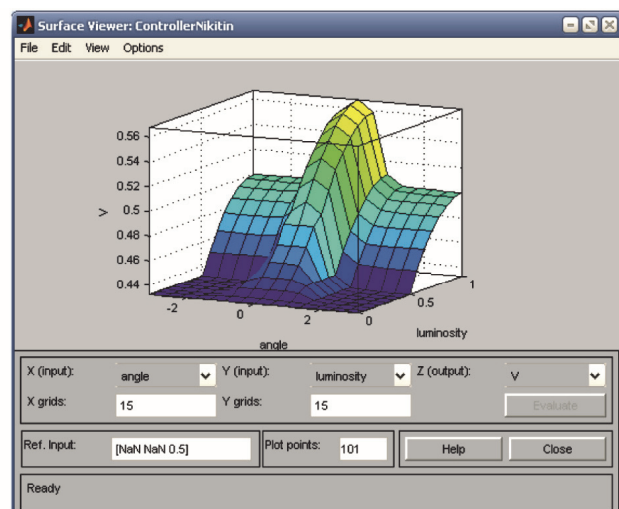


Рис. 7. Принцип действия алгоритма нечеткого вывода при управлении линейной (а) и угловой (б) скоростью ТМУ



а



б

Рис. 8. Графики зависимости скорости движения ТМУ: а — от проскальзывания и уровня освещенности; б — от угловой ошибки и уровня освещенности

сти перемещения МВР с небольшим приращением. Движения робота будут плавными, что позволит ему в условиях недетерминированного внешнего пространства достаточно точно осуществлять позиционирование, проводить диагностику и местный ремонт.

Экспериментальная проверка алгоритма. Для верификации алгоритма нечеткого вывода была проверена исходная предпосылка о возможности идентификации типа разветвления трубопровода по интегральной освещенности. С этой целью была создана трехмерная компь-

ютерная модель участка трубы в пакете 3ds Max и собран макет трубопровода с различными типами ответвлений (рис. 9).

Основной задачей компьютерного эксперимента являлось определение закона изменения уровня освещенности (обусловленного количеством света, отраженного от перпендикулярного участка трубы) в функции координаты ТМУ x . На рис. 10 представлен график этой зависимости (кривая 1).

Задачей натурального эксперимента было подтверждение результатов моделирования. График зависимости уровня освещенности L , про-

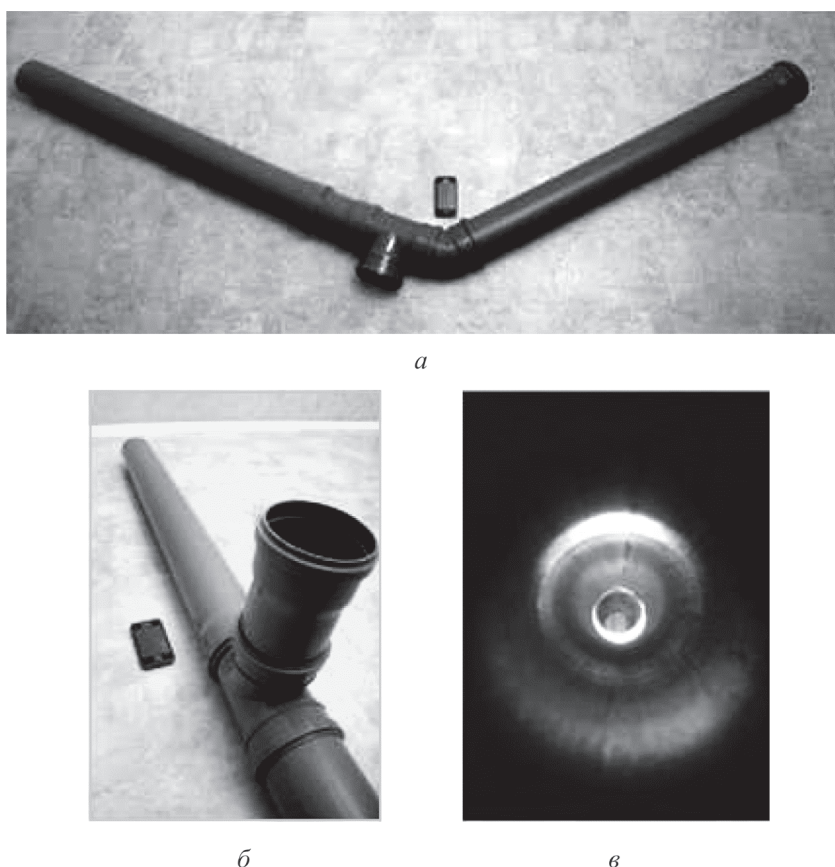


Рис. 9. Макет трубопровода с L-образным (а) и Т-образным (б) разветвлениями, внутренний вид трубы при L-образном разветвлении (в)

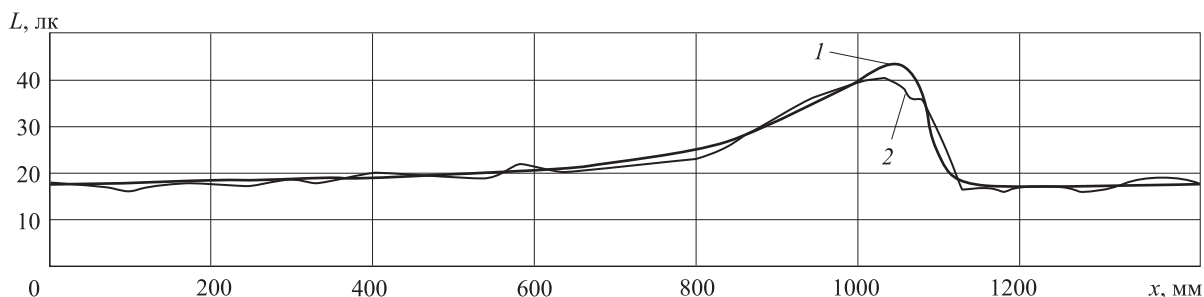


Рис. 10. Графики изменения уровня освещенности в трубе при движении макета ТМУ по направлению к Т-образному разветвлению:
1 — модель; 2 — эксперимент

порционного размеру пятна «засвета», от линейного положения x макета ТМУ показан на рис. 10 (кривая 2).

На рисунке видно, что расхождение значений уровня освещенности от координаты не превышает 5 %, это позволяет сделать вывод о правильности данных, полученных двумя способами.

Выводы

1. Предложена модульная конструкция МВР, позволяющего проводить диагностику внут-

ренней поверхности труб малого диаметра в автоматическом режиме. При разработке конструкции проведен анализ различных способов передвижения МВР внутри трубы и определена его эффективная кинематическая схема.

2. Разработанный алгоритм нечеткого вывода проверен при моделировании движения ТМУ МВР, а также при проведении натурного эксперимента с использованием макета трубопровода.

Литература

- [1] Градецкий В.Г., Князьков М.М., Кравчук Л.Н., Семенов Е.А. Методы движения миниатюрных управляемых внутритрубных роботов. *Нано- и микросистемная техника*, 2005, № 9, с. 37–45.
- [2] Gambao E., Hernando M., Brunete A. Multiconfigurable Inspection Robots for Low Diameter Canalizations. *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005*. September 11–14, 2005, Ferrara (Italy), pp. 1–6.
- [3] Vorotnikov S., Nikitin N., Ceccarelli M. A Robotic System for Inspection and Repair of Small Diameter Pipelines. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 02, pp. 180–196.
- [4] Sun L., Lu L., Qin X., Gong Z. Micro Robot for Detecting Wall Cracks of Pipe. *Proceedings of the 6th International Conference CLAWAR 2003*, Catania, Italy, 2003, pp. 643–650.
- [5] Dovica M., Gorzas M. Mechatronics aspects of in-pipe minimechanism of screw-nut principle design. *Recent Advances in Mechatronics*, 2007, pp. 335–339.
- [6] РД 153-34.0-20.522-99. Типовая инструкция по периодическому техническому освидетельствованию трубопроводов тепловых сетей в процессе эксплуатации. 2000. 36 с.
- [7] Гаврилов А.И., Гладков Э.А., Перковский Р.А. Видеокомпьютерные технологии построения компактных моделей протяженных сварных швов в системах автоматизированного мониторинга качества при строительстве магистральных трубопроводов. *Сварка и диагностика*, 2014, № 1, с. 57–61.
- [8] Петренко Е.О., Арбузов Е.В. Компьютерное моделирование электромагнитных полей накладных вихретоковых преобразователей в свободном пространстве. *XX Всероссийская НТК по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов*. Москва, 3–6 марта 2014 г. Москва, Издательский дом Спектр, 2014, с. 74–77.
- [9] Стребков Д.С., Королев В.А., Трубников В.З., Карачинцев А.В. Метод поиска повреждений силовых кабельных линий. *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*, 2014, № 8 (148), с. 79–83.
- [10] Ottaviano E., Vorotnikov S., Ceccarelli M., Kurenev P. Design Improvements and Control of a Hybrid Walking Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, vol. 59, iss. 2, pp. 128–141.
- [11] Ермишин К.В., Воротников С.А. Мультиагентная сенсорная система сервисного мобильного робота. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 6, с. 50–59.
- [12] Muscato G. Fuzzy Control of an Underactuated Robot with Fuzzy Microcontroller. *Microprocessors and Microsystems*, 1999, vol. 23, pp. 385–391.

References

- [1] Gradetskii V.G., Kniaz'kov M.M., Kravchuk L.N., Semenov E.A. Metody dvizheniia miniatiurnykh upravliaemykh vnugritrubnykh robotov [Methods of the Motion for the Miniature Inside-Tube Control Robots]. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika* [Nano and microsystem technique]. 2005, no. 9, pp. 37–45.
- [2] Gambao E., Hernando M., Brunete A. Multiconfigurable Inspection Robots for Low Diameter Canalizations. *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005 - September 11-14, 2005, Ferrara (Italy)*, pp. 1–6.

- [3] Vorotnikov S., Nikitin N., Ceccarelli M. A Robotic System for Inspection and Repair of Small Diameter Pipelines. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 02, pp. 180–196.
- [4] Sun L., Lu L., Qin X., Gong Z. Micro Robot for Detecting Wall Cracks of Pipe. *Proceedings of the 6th International Conference CLAWAR 2003*, Catania, Italy, 2003, pp. 643–650.
- [5] Dovica M., Gorzas M. Mechatronics Aspects of In-Pipe Minemachine of Screw-Nut Principle Design. *Recent Advances in Mechatronics*, 2007, pp. 335–339.
- [6] RD 153-34.0-20.522-99. *Tipovaiia instruksiiia po periodicheskomu tekhnicheskomu osviedel'stvovaniiu truboprovodov teplovykh setei v protsesse ekspluatatsii* [Standard instruction for the periodic technical inspection of pipelines of heat networks in operation]. 2000.
- [7] Gavrilov A.I., Gladkov E.A., Perkovskii R.A. Videokomp'iuternye tekhnologii postroeniia kompaktnykh modelei protiazhennykh svarnykh shvov v sistemakh avtomatizirovannogo monitoringa kachestva pri stroitel'stve magistral'nykh truboprovodov [Video-computer technology to build compact models extended welds in automated quality monitoring systems in the construction of pipelines]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 1, pp. 57–61.
- [8] Petrenko E.O., Arbuzov E.V. Komp'iuternoe modelirovanie elektromagnitnykh polei nakladnykh vikhretokovykh preobrazovatelei v svobod-nom prostranstve [Computer modeling of the electromagnetic fields overhead eddy current probes in the headspace]. *20 Vse-rossiiskaia NTK po nerazrushaiushchemu kontroliu i tekhnicheskoi diagnostike: tezisy dokladov* [20 All-Russian Tax Code and technical diagnostics: Abstracts]. Moscow, 3–6 Mach 2014. Moscow, Spektr publ., 2014, pp. 74–77.
- [9] Strebkov D.S., Korolev V.A., Trubnikov V.Z., Karachintsev A.V. Metod poiska povrezhdenii silovykh kabel'nykh linii [Method of location the power cable lines damages]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal «Al'ternativnaia energetika i ekologiya»* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology]. 2014, no. 8(148), pp. 79–83.
- [10] Ottaviano E., Vorotnikov S., Ceccarelli M., Kurenev P. Design improvements and control of a hybrid walking robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, vol. 59, iss. 2, pp. 128–141.
- [11] Ermishin K.V., Vorotnikov S.A. Mul'tiagentnaia sensornaia sistema servisnogo mobil'nogo robota [A multi-sensor system service mobile robot]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering]. 2012, no. 6, pp. 50–59.
- [12] Muscato G. Fuzzy Control of an Underactuated Robot with Fuzzy Microcontroller. *Microprocessors and Microsystems*, 1999, vol. 23, iss. 6, pp. 385–391.

Статья поступила в редакцию 25.05.2015

Информация об авторах

ВОРОТНИКОВ Сергей Анатольевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vorotn@bmstu.ru).

НИКИТИН Никита Игоревич (Москва) — аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ЧЕККАРЕЛЛИ Марко (Кассино) — профессор кафедры «Механика машин» и директор Лаборатории робототехники и мехатроники (ЛАРМ) в Университете Кассино в г. Кассино (Италия). В 2008–2011 гг. — президент Международной федерации по продвижению науки о машинах и механизмах.

Information about the authors

VOROTNIKOV Sergey Anatolievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Robotic Systems and Mechatronics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, email: vorotn@bmstu.ru).

NIKITIN Nikita Igorevich (Moscow) — Post Graduate, Department of Robotic Systems and Mechatronics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

CECCARELLI Marco (Cassino) — Professor, Department of Mechanics of Machines and Director, Laboratory of Robotics and Mechatronics (LARM), University of Cassino, Cassino (Italy). From 2008 to 2011 he served as the President of the International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science (IFTOMM).