

*Алейников А.Ю., руководитель СКБ ИИТиЕН, ассистент,
Афонин А.Н., д-р техн. наук, проф.,
Гладышев А.Р., техник-проектировщик*

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗМЕЕПОДОБНОГО РОБОТА ДЛЯ ИНСПЕКЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ*

aleinikov@bsu.edu.ru

Аварии трубопроводов являются одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных катастроф. Одним из наиболее перспективных способов выявления дефектов трубопроводов является применение змееподобных мобильных роботов, обладающих повышенной проходимостью. Установлено, что ограниченность применения существующих змееподобных роботов связана с их низкой энергоэффективностью. Предложена новая конструкция мобильных змееподобных роботов, отличающаяся повышенной грузоподъемностью и энергоэффективностью. Конструкция включает в себя механические узлы, в которых детали корпуса одновременно являются частью редуктора, и распределенную систему управления и энергообеспечения.

Ключевые слова: *змееподобный робот, математическая модель движения, распределенная система управления, датчик, навигация, система энергообеспечения.*

Введение. Аварии трубопроводов являются одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных катастроф. В связи с этим, выявление дефектов трубопроводов является важной проблемой в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве. Для выявления подобных дефектов все большее применение находят разнообразные мобильные роботы. Змееподобные роботы являются одним из наиболее перспективных видов мобильных роботов для инспекции трубопроводов ввиду наличия значительного числа степеней свободы, что позволяет осуществить передвижение с перемещением полезного груза и выполнение полезной функции в среде, имеющей препятствия различного рода и формы. Спектр задач для использования робототехнических устройств подобного вида для инспекции трубопроводов может включать задачи, связанные с поиском дефектов на внутренних поверхностях, когда от робота требуется осуществить сравнительно быстрое перемещение в любую точку трубопровода. При определенных условиях змееподобный робот может быть способен передвигаться и с внешней стороны трубопровода, что делает его особенно незаменимым при поиске дефектов.

Принцип действия мобильного змееподобного робота основан на подражании движениям змеи. Перемещение такого робота в пространстве осуществляется за счет волнообразного движения его тела, состоящего из отдельных звеньев. При этом привод каждого звена должен иметь мощность, достаточную для перемещения нескольких других звеньев.

Начало разработкам змееподобных роботов было положено японским ученым Shigeo Hirose в 70-е годы. Предложенная им конструкция бы-

ла собрана из последовательно соединенных однотипных модулей [1, 2]. Предпосылкой для разработки конструкций такого рода явилась их потенциальная возможность для адаптации к сложной среде в трехмерном пространстве, что делает их незаменимыми при выполнении задач по инспекции и диагностики трубопроводов различных видов [3–7].

На настоящий момент предложено немало конструкций змееподобных роботов, собранных преимущественно на основе сервоприводов. Например, конструкция [8] имеет 11 одинаковых звеньев с двумя перпендикулярно закрепленными сервоприводами (серводвигателями с редуктором) в каждом, голову и хвост. Радиальное перемещение звеньев друг относительно друга осуществляется посредством пары сервоприводов, расположенных перпендикулярно относительно друг друга в каждом звене. Момент вращения каждого сервопривода составляет не менее 0,8 Нм. Конструкция [9, 10] представляет собой цепь из 16 звеньев, соединенных двухступенными шарнирами вращения, ортогональные оси которых лежат в одной плоскости. В каждом шарнире имеются два минисервопривода, которые обеспечивают повороты вилки вокруг вертикальной и горизонтальной осей.

Недостатком конструкций [8, 9] и [10, 11], являющихся наиболее распространенными при построении змееподобных роботов, является необходимость применения высокомоментных сервоприводов ввиду того, что крутящий момент от них прикладывается в зоне оси звена, в связи с чем при повороте звена им приходится воздействовать на плечо рычагов, равных радиусу звена. В связи с низкой энергоэффективностью подобные роботы имеют низкую грузо-

подъемность, что ограничивает их возможности для практического применения. В частности, они не могут транспортировать тяжелые приборы для неразрушающего контроля трубопроводов. Конструкция [15] состоит из 10 звеньев, каждое из которых имеет по два сервопривода для осуществления поворота в двух плоскостях. В отличие от предыдущих решений, кроме редуктора в самом сервоприводе присутствует также внешний редуктор, имеющий цепную и червячную передачи, что повышает крутящий момент каждого звена и увеличивает грузоподъемность системы и ее динамические характеристики. Однако такая конструкция является достаточно сложной в изготовлении и дорогостоящей. Использование в ней червячной передачи налагает на робота определенные дополнитель-

ные ограничения, связанные, в частности, с отсутствием обратимости движения в ней.

Основная часть. Предлагаемый вариант конструкции змееподобного робота и его системы энергообеспечения позволяет частично исправить недостатки существующих конструкций.

Основой механической конструкции является набор звеньев 1, расположенных перпендикулярно друг относительно друга. Каждое из звеньев имеет на себе сектор конического зубчатого колеса (рис. 1).

Сервоприводы 2 имеют на своих осях конические шестерни, зацепляясь которыми с зубчатыми секторами на перпендикулярных оси привода звеньях, они обеспечивают поворот звеньев друг относительно друга.

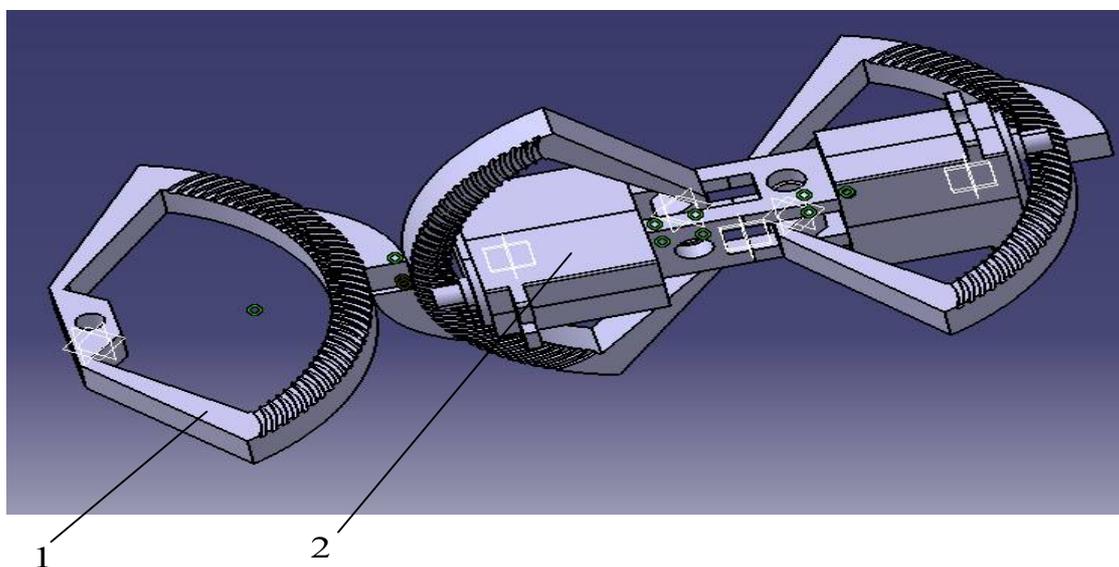


Рис. 1. Конструкция звеньев змееподобного робота

Образованная шестерней на серводвигателе и сектором на звене понижающая зубчатая передача позволяет снизить требуемую мощность приводов и повысить энергоэффективность робота. По сравнению с конструкцией [8] она позволяет снизить максимальную требуемую мощность сервоприводов в 2 – 3 раза. Детали передачи являются достаточно технологичными и могут быть изготовлены на универсальном фрезерном станке с ЧПУ.

Для реализации управления приводами звеньев робота предложенной конструкции, сторонние решения могут быть не всегда удобными, в том числе из-за неприемлемых габаритных характеристик. [12–14] В дополнение, с целью увеличения надежности системы, желательно иметь минимум возможных соединительных проводов между звеньями и их сечения.

Для управления углами поворота звеньев предлагается система управления и энергообес-

печения, схема которой представлена на рисунке 2.

Для управления каждой парой сервоприводов предусмотрена одна плата, задача которой является реализация ШИМ сигнала, длительность импульса которого пропорциональна углу поворота мотора, анализ токового потребления, зависящего от механической нагрузки на соответствующий мотор, регистрация угла поворота посредством магнитного энкодера, управления супервизором питания и обмен данными с управляющим контроллером. Функцией управляющего контроллера является задание целевой функции и получение внешних (при необходимости) команд. Также в систему может быть введен регистратор и анализатор видео и другие необходимые для инспекции трубопроводов датчики. Более высокая энергоэффективность робота позволит устанавливать на них более массивные приборы, в том числе дефектоскопы.

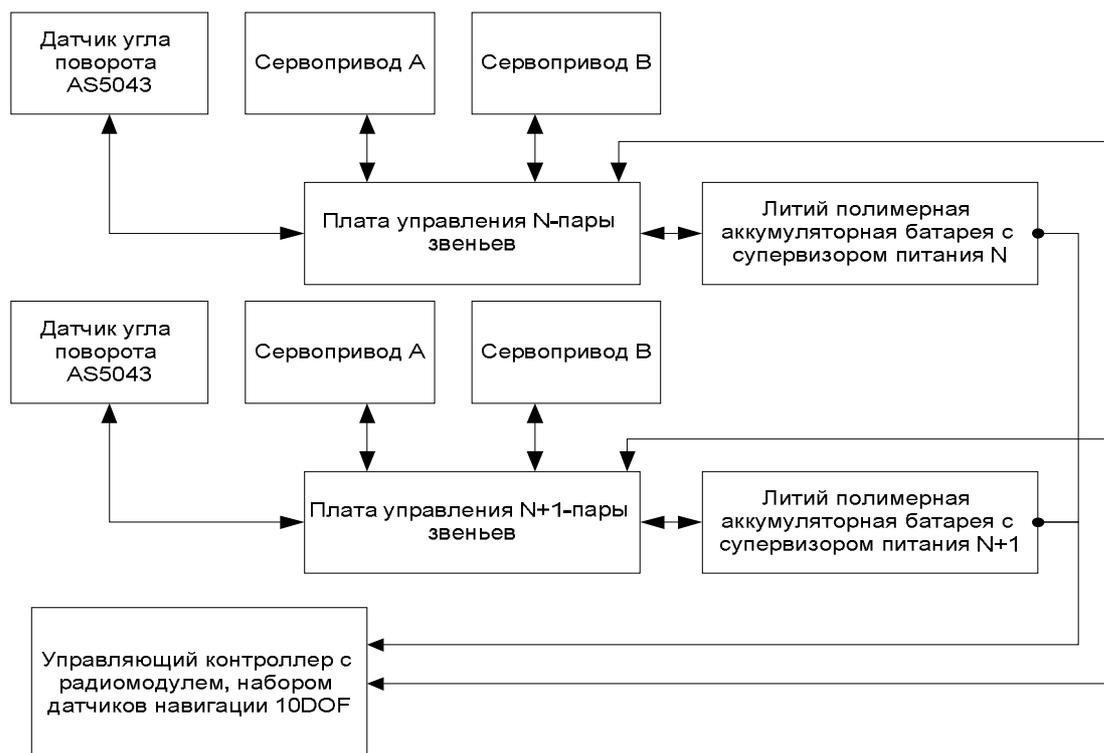


Рис. 2. Схема системы управления змееподобным роботом

В связи с тем, что сервопривод каждого звена может подвергаться неравномерной нагрузке, а также с целью распределения весовой нагрузки вдоль тела робота система энергообеспечения также реализуется распределенной, но при этом сами аккумуляторы всех звеньев соединены между собой, точно также, как и выходы супервизоров.

Выводы. Разработанная конструкция змееподобного робота для инспекции трубопроводов отличается от существующих аналогов более высокой подвижностью и энергоэффективностью. Ее применение позволит использовать змееподобных роботов для инспекции трубопроводов в строительстве и ЖКХ, что снизит количество техногенных аварий и катастроф.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 16-38-00612.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Umetani Y., Hirose S. Biomechanical study of serpentine locomotion// Proceedings of 1st Ro-ManSy Symposium, Udine, Italy, Springer-Verlag.1974. Pp. 171–184.
2. Hirose S. Biologically Inspired Robots: Snakelike Locomotors and Manipulators: Oxford University Press, 1993. 240 p.
3. Segon Roh and Hyouk Ryeol Choi. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines, IEEE Transactions on Robotics, vol 21. 2005. Pp. 1–17.

4. Akina Kuwada, Kodai Tsujino, Koichi Suzumori and Takefumi Kanda, Intelligent actuators realizing snake-like small robot for pipe inspection, MHS 2006 Micro-Nano COE, MP1-2-1. 2006. Pp. 20.

5. Josep M. Mirats Tur and William Garthwaite, Robotic devices for water main in-pipe inspection a survey, Journal of Field Robotics, 27(4). 2010. Pp. 491–508.

6. Jong-Hoon Kim, Gokarna Sharma, and S. Sitharama Iyengar, FAMPER: A Fully Autonomous Mobile Robot for Pipeline Exploration, IEEE. 2010. Pp. 517–523.

7. Manabu Ono and Shigeo Kato, A study of an eartworm type inspection robot movable in long pipes, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 7. 2010. Pp. 095–090.

8. Алейников А.Ю., Афонин А.Н. Мобильное робототехническое устройство с волнообразным способом передвижения // Матер. 4-й Междунар. научно-практ. конф. «Современные материалы, техника и технология». Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. С. 23–26.

9. Афонин А.Н. Реализация конструкции автономного мобильного змееподобного робота / Афонин А.Н., Алейников А.Ю., Гладышев А.Р., Новосельцев А.Д. // Экстремальная робототехника // Труды международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. С. 250–253.

10. Иванов А.А., Шмаков О.А., Демидов Д.А. Экспериментальное исследование змеевид-

ного робота «Змеелок – 3» // Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2013, Вып. 1. С. 132–138.

11. Hopkins J.K., Spranklin B.W., Gupta S.K. A survey of snake-inspired robot designs // *Bioinspiration and Biomimetics*, 4(2):021001, 2009. Pp. 7–17.

12. Lu Z., et al., Study on the motion control of snake-like robots on land and in water. *Perspectives in Science* ‘Proceedings of the 1st Czech-China Scientific Conference 2015.2015. Pp. 1–8.

13. Inoue K, Ma S, Jin C. Neural oscillator network-based controller for meandering loco-

tion of snake-like robot. In: *Proceedings of 2004 international conference on robotics and automation*, New Orleans, USA; 2004. Pp. 5064–69.

14. Lu Z, Ma S, Li B, Wang Y. 3D locomotion of a snake-like robot controlled by cyclic inhibitory CPG model. In: *Proceedings of 2006 international conference on intelligent robots and systems*, Beijing, China; 2006. Pp. 3897–902.

15. Pål Liljebäck etc. *Snake Robots. Modeling, Mechatronics, and Control*. 2013. 316p.

Aleynikov A. Yu., Afonin A.N., Gladishev A.R.

IMPROVEMENT OF CONSTRUCTION OF SNAKE LIKE ROBOT FOR PIPES INSTECTION

Pipeline accidents are one of the most common and hazardous man-made disasters. One of the most promising ways to detect pipeline defects is the use of snake-like mobile robots, with increased permeability. It was found that the limited application of existing serpentine robots is related to their low energy efficiency. A new design of mobile robots serpentine, wherein increased carrying capacity and energy efficiency. The design includes mechanical components, in which the body parts at the same time are part of the gearbox, and a distributed control system and energoobespecheniya. Klyuchevye words: snake-like robot, the mathematical model of the motion, distributed control systems, sensors, navigation, power supply system.

Keywords: snake-like robot, the mathematical model of the motion, distributed control systems, sensors, navigation, power supply system.

Алейников Андрей Юрьевич, руководитель СКБ ИИТиЕН, ассистент кафедры материаловедения и нанотехнологий.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Адрес: Россия, 308007, Белгород, ул. Студенческая, д. 14.

E-mail: aleinikov@bsu.edu.ru

Афонин Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Адрес: Россия, 308007, Белгород, ул. Студенческая, д. 14.

E-mail: afonin@bsu.edu.ru

Гладышев Андрей Романович, техник проектировщик.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Адрес: Россия, 308007, Белгород, ул. Студенческая, д. 14.

E-mail: 1173079@bsu.edu.ru