

МНОГОЗВЕННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ВНУТРИ ТРУБ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

М. М. Князьков, Е. А. Семенов, М. Ю. Рачков



КНЯЗЬКОВ
Максим
Михайлович

Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Специалист в области автоматизации, робототехники и мехатроники. Автор 28 работ и 3 изобретений.



РАЧКОВ
Михаил
Юрьевич

Доктор технических наук, профессор, академик Российской академии космонавтики. Заведующий кафедрой «Автоматика, информатика и системы управления» Московского государственного индустриального университета. Специалист в области автоматизации, робототехники и измерительных систем. Автор более 250 работ, в том числе 12 книг и более 60 изобретений. Монографии по роботам вертикального перемещения и по автоматизации разминирования являются приоритетными в данных областях. Член Учебно-методического совета по автоматизации машиностроения Минобрнауки РФ. Член редколлегии научно-технического журнала «Мехатроника, автоматизация, управление».



СЕМЕНОВ
Евгений
Александрович

Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, ученый секретарь Научного совета РАН по робототехнике и автоматизированному производству. Специалист в области автоматизации, робототехники и мехатроники. Автор более 30 научных работ и 10 изобретений.

Введение

Актуальность работ по созданию роботов для движения внутри труб малого диаметра связана, в первую очередь, с необходимостью повышения эффективности выполнения технической диагностики трубопроводов различного назначения, в частности, в машиностроении.

К основным способам передвижения роботов по криволинейным трубопроводам, произвольно расположенным в пространстве, следует отнести

© М.М. Князьков, Е.А. Семенов, М.Ю. Рачков, 2009

шагающий принцип перемещения многостопных шарнирных устройств. Также используются колесные шасси с прижимом колес к поверхности движения и гусеничные приводы [1, 2].

При движении в трубопроводах, заполненных жидкостями, например водой, маслом, горючими веществами или полимерными растворами, используются принципы продвижения за счет возбуждения волновых продольных и поперечных колебаний корпуса генерации в нем бегущих волн смещения. Основными движителями таких роботов являются пьезоэлектрические приводы, состоящие из тонких керамических пластин, которые изгибаются, когда к ним подается напряжение, и возвращаются к первоначальной форме при отключении напряжения. Еще одним вариантом получения продольных волновых колебаний оболочек роботов является использование полипиррола для их изготовления. При прохождении электрического тока через элемент, выполненный из этого материала, он сокращается [3, 4].

Все указанные конструкции имеют внешние приводные элементы, что снижает их надежность из-за возможности поломки при контакте со стенками трубопровода.

Внутритрубный робот ударного перемещения

Модуль внутритрубного реверсивного робота (рис. 1) состоит из среднего звена – движителя 1, а также двух крайних звеньев – тормозных блоков 2. Среднее звено представляет собой электромагнитный узел, состоящий из электромагнитной катушки 3 с сердечником 4. Сердечник снабжен возвратной пружиной 5. Два крайних звена состоят из электромагнит-

ной катушки 6 с сердечником 7 и возвратной пружины 8. На сердечник 7 крепится регулируемый тормозной элемент 9, который под воздействием возвратной пружины 8 или сердечника 7 обеспечивает тормозящий эффект в заданном направлении передвижения робота внутри трубы. Тормозной элемент 9 состоит из двух лепестковых упруго-эластичных упоров 10 и 11, которые через прорези в корпусе звена выходят наружу и в зависимости от расположения сердечника 7 обеспечивают торможение в нужном направлении. Звенья соединены между собой шарнирными связями 12, которые дают возможность разворота модуля на определенный угол при преодолении изгибов трубы. Конструкция данного модуля состоит из стандартных элементов. В качестве элементов питания используются минибатареи серийных образцов.

Принцип перемещения робота основан на том, что сердечник электромагнитной катушки, передвигаясь внутри корпуса, ударяет в переднюю стенку, передавая ей импульс [5, 6]. Получив импульс, корпус начинает двигаться вперед. После остановки сердечник плавно отходит назад и разгоняется. Корпус при обратном движении сердечника остается неподвижным из-за наличия силы трения. Затем сердечник, разогнавшись, снова ударяет в корпус и передает ему новый импульс для движения.

Предложенная схема робота не имеет внешних приводных частей и обладает повышенной надежностью. Диаметр конструкции меньше внутреннего диаметра трубопровода и адаптируется под определенные изменения его размера.

Как показано на рис. 2, многозвенный внутритрубный робот состоит из базовых модулей.

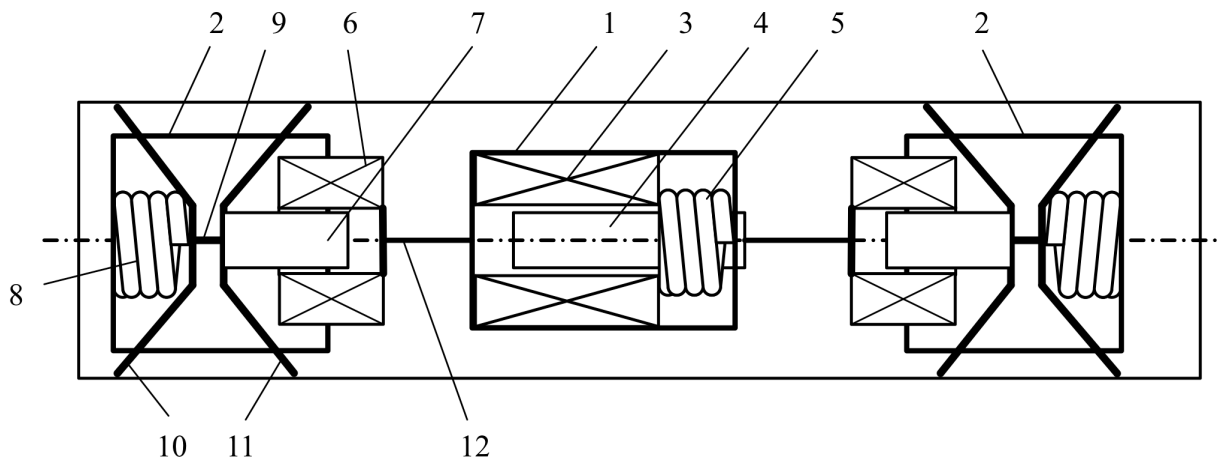


Рис. 1. Модуль реверсивного внутритрубного робота

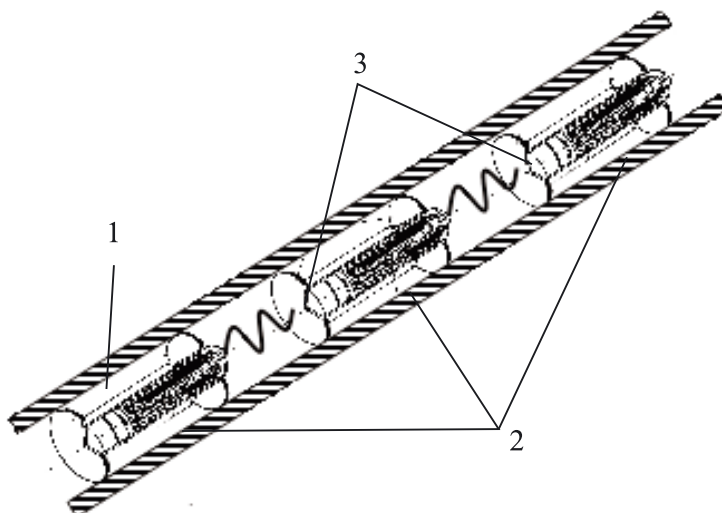


Рис. 2. Модель многозвенного робота из базовых модулей:
1 – труба, 2 – модули, 3 – связи

Методика расчета указанной конструкции может быть основана на законе сохранения энергии [5]. При ударе сердечника о корпус закон сохранения энергии и импульса будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} mv + MV = mv_0; \\ \frac{mv^2}{2} + \frac{MV^2}{2} + Q = \frac{mv_0^2}{2}, \end{cases}$$

где m и M – массы сердечника и корпуса соответственно; v и V – их скорости после соударения; v_0 – скорость сердечника до удара; Q – тепловая энергия от удара, известная для конкретной конструкции.

Решение данной системы имеет вид:

$$\begin{cases} v = \frac{m}{m+M} \left(v_0 - \frac{m+M}{m} \sqrt{v_0^2 - \left(1 + \frac{m}{M}\right) \frac{2}{m} Q} \right); \\ V = \frac{m}{m+M} \left(v_0 + \sqrt{v_0^2 - \left(1 + \frac{m}{M}\right) \frac{2}{m} Q} \right). \end{cases}$$

Отсюда видно, что скорость V корпуса

растет при $Q \rightarrow 0$, $\frac{m}{M} \rightarrow \infty$. Рассмотрим движение системы после соударения. Пусть сердечник имеет координату вдоль направления движения x_1 , а корпус – x_2 . Коэффициент жесткости пружины равен k , а сила трения упоров о трубопровод – $F_{тр}$. Тогда уравнения движения системы будут следующими:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = -k(x_1 - x_2); \\ M\ddot{x}_2 = -k(x_2 - x_1) + F_{тр}. \end{cases}$$

Решение этой системы имеет вид:

$$\begin{cases} x_1(t) = C_1 + C_2 t + F_{тр} \frac{1}{2(m+M)} t^2 + \\ \quad + C_3 \cos(\omega t) + C_4 \sin(\omega t); \\ x_2(t) = \left(C_1 + \frac{m}{k(m+M)} F_{тр} \right) + C_2 t + \\ \quad + F_{тр} \frac{1}{2(m+M)} t^2 - C_3 \frac{m}{M} \cos(\omega t) - \\ \quad - C_4 \frac{m}{M} \sin(\omega t), \end{cases}$$

где $\omega = \sqrt{k \frac{m+M}{mM}}$; $C_1 - C_4$ – постоянные.

Если за начальные условия принять

$$\begin{cases} x_1(0) = x_0; \\ \dot{x}_1(0) = v; \\ x_2(0) = y_0; \\ \dot{x}_2(0) = V, \end{cases}$$

то для постоянных $C_1 - C_4$ получим выражения:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{M}{m+M} \left(\frac{m}{M} x_0 + y_0 - \frac{m}{k(m+M)} F_{тр} \right), \\ C_2 &= \frac{M}{m+M} \left(\frac{m}{M} V - v \right), \\ C_3 &= \frac{M}{m+M} \left(\frac{m}{M} x_0 - y_0 + \frac{m}{k(m+M)} F_{тр} \right), \\ C_4 &= \frac{M}{m+M} \frac{1}{\omega} (v - V). \end{aligned}$$

Использование этих соотношений требует уточняющих экспериментальных проверок, однако позволяет производить оценочный расчет режимов движения робота для различных вариантов его конструктивного выполнения и для различных материалов внутренней поверхности трубопровода, определяющей $F_{тр}$.

Внутритрубный робот безударного перемещения

Возможен безударный режим передвижения робота со схемой, аналогичной вышеописанной, которая приведена на рис. 3.

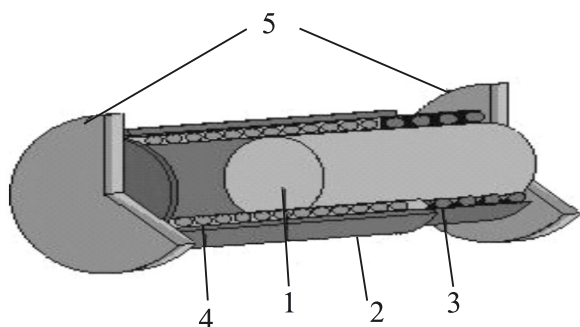


Рис. 3. Модуль внутритрубного робота безударного перемещения

Схема включает шток 1 и корпус 2. На шток надета пружина 3, которая стремится вытолкнуть его из корпуса, когда снимается напряжение с электромагнитной катушки 4. Шток и корпус снабжены упорами 5, материал которых обладает анизотропией по трению [7]. Упоры сконструированы так, что при движении робота в желаемом направлении трение о поверхность трубы слабее, чем при движении в обратном направлении. Во время движения на электромагнитную катушку подается ток в виде прямоугольных импульсов. Движение робота осуществляется повторением циклов, каждый из которых состоит из двух этапов: втягивание штока и его выталкивание.

Методика расчета параметров движения внутритрубного робота безударного перемещения может быть основана на предположении, что движение робота происходит в прямолинейной трубе, ось которой наклонена к горизонту под углом β . Введем обозначения: x_i ($i = 1, 2$) – координаты штока и корпуса, соответственно отсчитываемые вдоль оси трубы (абсолютные смещения штока и корпуса); m_i ($i = 1, 2$) – массы штока

и корпуса соответственно; k – коэффициент жесткости пружины; g – ускорение силы тяжести. Здесь и далее индекс $i = 1$ соответствует штоку, $i = 2$ – корпусу. Точки отсчета координат x_1 и x_2 выбраны так, что при $x_1 = x_2$ пружина не деформирована, а в начальный момент времени $x_i = 0$ ($i = 1, 2$). Шток втягивается в электромагнитную катушку под действием электромагнитной силы F . Кроме того, на шток и катушку действуют силы упругости пружины, равные $k|x_2 - x_1|$ по абсолютной величине и противоположно направленные, сила тяжести $m_i g$ и сила реакции поверхности N_i перемещения при скольжении упоров. На шток и корпус также действуют силы сухого трения $F_{тр i}$ и силы сопротивления среды $D_i \dot{x}_i$, где D_i – коэффициент сопротивления среды, который в общем случае может быть разным для штока и корпуса. С учетом этого, уравнения движения внутритрубного робота как двухмассовой системы запишутся в таком виде:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -F + k(x_2 - x_1) - m_1 g \sin \beta - F_{тр 1} - D_1 \dot{x}_1; \\ m_2 \ddot{x}_2 = F - k(x_2 - x_1) - m_2 g \sin \beta - F_{тр 2} - D_2 \dot{x}_2, \end{cases}$$

$$F_{тр i} = \begin{cases} \mu^+ N_i, (\dot{x}_i \geq 0 \text{ и } R_i \geq \mu^+ N_i); \\ -\mu^- N_i, (\dot{x}_i \leq 0 \text{ и } R_i \leq -\mu^- N_i); \\ R_i, (\dot{x}_i = 0 \text{ и } -\mu^- N_i \leq R_i \leq \mu^+ N_i), \end{cases}$$

$$R_i = (-1)^i [F - k(x_2 - x_1)] - m_i g \sin \beta - D_i \dot{x}_i, \quad i = 1, 2,$$

где μ^+ – коэффициент трения между упорами и поверхностью при скольжении упора в направлении движения; μ^- – коэффициент трения между упорами и поверхностью при скольжении в обратном направлении [7].

На электромагнитную катушку подается питание в виде периодически повторяющихся прямоугольных импульсов. Выражение для электромагнитной силы имеет следующий вид:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} I^2,$$

где W – электромагнитная энергия, L – индуктивность, I – сила тока в обмотке соленоида.

Использование этих уравнений позволяет моделировать движение и оптимизацию входящих в них параметров для различных вариантов конструктивного выполнения робота.

**Целевое оборудование
и конструктивные варианты
выполнения роботов**

В состав целевого оборудования роботов при движении внутри труб малого диаметра могут входить датчики диагностики внутренней поверхности труб, телекамеры с обычной и инфракрасной оптикой, аппаратура для информационной связи с пультами управления и наблюдения, технологический инструмент для сверления, чистки и сварки, а также устройства для протяжки связного кабеля и датчики физических параметров окружающей среды (радиации, влажности, температуры, задымления).

Пример цифровой микровидеокамеры, сопрягаемой с разработанным роботом, приведен на рис. 4 рядом с однокопеечной монетой.



Рис. 4. Цифровая микровидеокамера для робота

С помощью микровидеокамеры, смонтированной на работе, можно получить изображение внутренней поверхности трубы.

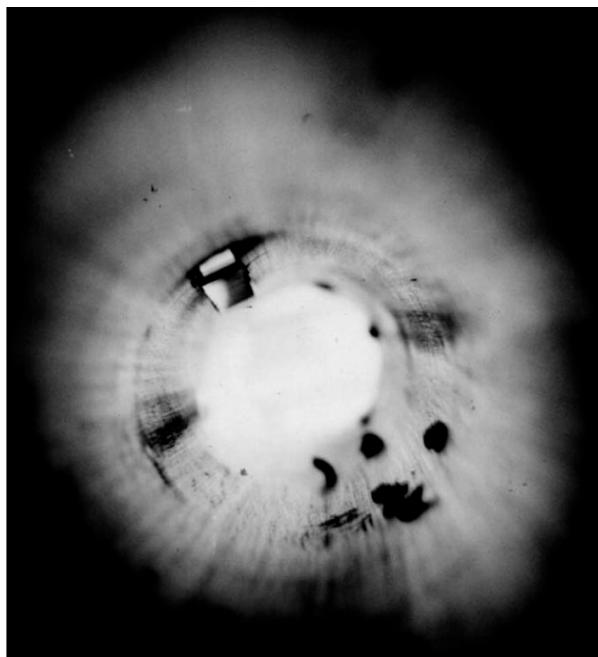


Рис. 5. Изображение внутренней поверхности трубы, снятое микровидеокамерой

Как показано на рис. 5, на внутренней поверхности трубы различимы объекты, которые после идентификации могут быть при необходимости удалены самим роботом.

Скорость перемещения робота рассмотренного типа зависит от частоты импульсов, подавае-

Таблица

Характеристики конструктивных вариантов роботов

Наименование характеристик	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Диаметр, мм	5	10	20
Тип двигателя	электромагнитный	электромагнитный	электромагнитный
Напряжение, В	6–10	10–15	15–20
Ток, А	0,4	1,0	1,5
Частота управляющих импульсов, Гц	4–20	4–30	4–70
Потребляемая мощность, Вт	3,2–4,0	10–15	22,5–30,0
Скорость движения, мм/с	4–10	6–20	6–30
Точность позиционирования, м	0,5	0,7	0,8
Радиус разворота, м	0,1	0,4	0,6
Дальность действия, м	10	50	70
Полезная нагрузка, Н	0,05	0,5	2,0

мых на обмотку электромагнитного двигателя. Так при частоте импульсов $f = 10$ Гц скорость перемещения равна 6 см/с, а для $f = 15$ Гц скорость составляет 9 см/с. Таким образом, время передвижения робота на этих частотах внутри трубопровода на расстояние 10 м занимает в среднем около 2 мин.

Характеристики конструктивных вариантов роботов с различными внешними диаметрами представлены в таблице.

Экспериментальный образец электромагнитного робота с внешним диаметром 12 мм, который может перемещаться внутри горизонтальных и вертикальных труб, показан на рис. 6.

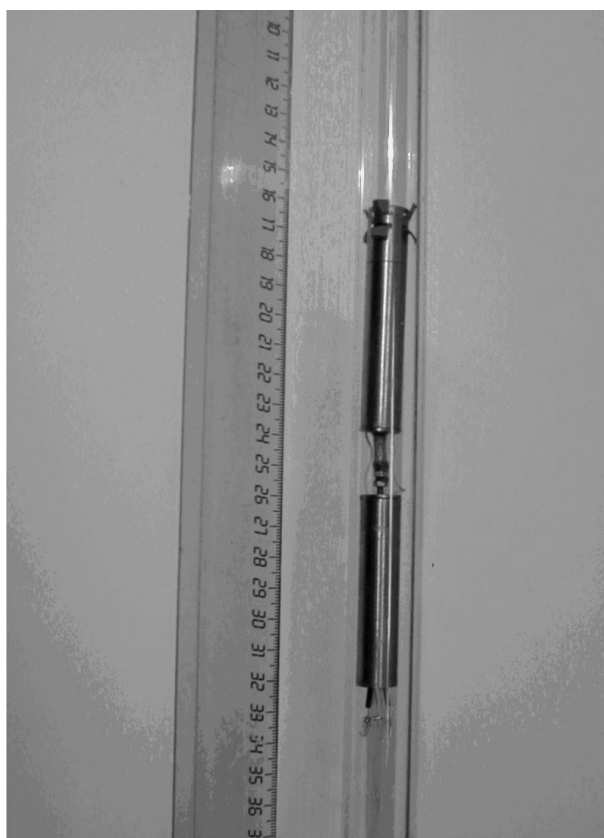


Рис. 6. Движение робота по вертикальной трубе

Численные значения параметров созданного образца электромагнитного робота следующие:

• габариты, мм	12×12×136
• масса, г	50
• рабочий диапазон диаметров трубопроводов, мм	14–18
• минимальный радиус закругления трубы, мм	0,5
• скорость перемещения, мм/с	7,96
• тяговое усилие, Н	1,5
• дальность перемещения, м	60

- погрешность позиционирования, % 2,5
- полезная нагрузка, Н 0,2
- потребляемая мощность, Вт 15.

Приведенная конструкция образца электромагнитного робота может послужить прототипом для создания других вариантов исполнения робота и экспериментальной проверки вышеприведенных методик расчета его параметров.

Заключение

Предложенные схемы мобильных роботов позволяют реализовывать перемещение внутри трубопроводов малых диаметров с различным углом наклона и с определенной кривизной. На борту робота может находиться технологическое оборудование, которое транспортируется на заданное расстояние внутри трубопровода и позволяет осуществлять диагностику внутренней поверхности трубы, а также другие операции при соответствии веса технологического оборудования допустимой полезной нагрузке.

Список литературы

1. V. Gradetsky, M. Pushkin, M. Rachkov, Control motion of two-links mobile robot with flexible connections // Proc. of the 4th Int. Conf. on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems – Moscow, 1998. P. 102–107.
2. Пат. РФ № 98108229. Внутритрубный мобильный миниробот, полезная модель / Рачков М.Ю., Пушкин М.М., 1998.
3. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Кравчук Л.Н., Семенов Е.А. Методы движения миниатюрных управляемых внутритрубных роботов // Микросистемная техника. 2005. № 9.
4. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Семенов Е.А. Проблемы адаптивного движения мехатронных макро- и микросистем // Межд. симпозиум по адаптивным и интеллектуальным роботам. – М., 2005. С. 83–93.
5. V. Gradetsky, V. Solovtsov, M. Knyazkov, G.G. Rizzotto, P. Amato. Modular Design of Electro-Magnetic Mechatronic Microrobots // Proc. of the 6th CLAWAR 2003 Int. Conf., – Italy. 2003. P. 651–658.
6. Пат. RU 4270. Внутритрубное транспортное средство, полезная модель / Градецкий В.Г., Кравчук Л.Н., Рачков М.Ю. и др., 1996.
7. Чашухин В.Г. Моделирование динамики и определение управляющих параметров внутритрубного миниробота. // Теория и системы управления. 2008. № 5. С. 142–147.