

В. Г. Градецкий, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,
В. Г. Чашухин, ст. науч. сотр., ketlk@mail.ru,
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

Исследование динамики миниатюрных внутритрубных роботов вибрационного типа¹

Приводятся результаты исследований динамики миниатюрных внутритрубных роботов вибрационного типа, оснащенных скользящими устройствами сцепления с внутренними поверхностями труб малых диаметров. Приводятся зависимости параметров роботов от частоты и длительности управляющих импульсов. Анализируется влияние колебаний разной частоты на характеристики роботов при движении в средах различной вязкости.

Ключевые слова: миниатюрный робот, электромагнитный принцип действия, колебательные процессы, механизм сцепления, труба малого диаметра

Введение

Для миниатюрных роботов, принцип действия которых основан на частотной модуляции и изменении частоты колебаний, актуальной задачей является исследование влияния колебательных процессов на их функциональные характеристики. К таким роботам относятся роботы с электромагнитным принципом действия, изучение которых выполняется во многих научных центрах как в нашей стране, так и за рубежом [1–6]. Изучение колебательных процессов дает возможность получить зависимости между функциональными и частотными характеристиками, определив соответствие рабочих параметров требуемым значениям, улучшить качество и расширить возможности роботов. Миниатюрные роботы с электромагнитными приводными системами и технологическими датчиками на борту предназначены в основном для обеспечения прямого и реверсивного движения внутри труб малого диаметра (5–20 мм) и анализа качества внутренних поверхностей труб, для неразрушающего контроля и других инспекционных операций в энергетике, например, на атомных станциях, в авиационной и авиакосмической промышленности [6–9]. В статье приводятся уравнения движения электромагнитного внутритрубного робота, номограммы и характеристики, которые могут использоваться при проектировании миниатюрных роботов целевого назначения.

Особенности роботов вибрационного типа

Фотографии и схематическое устройство робота одностороннего действия представлены на

рис. 1 и 2 соответственно (см. вторую сторону обложки). Основные составляющие его конструкции — корпус и шток, который совершает периодические колебания относительно корпуса. Внутри корпуса находится соленоид, в который втягивается шток при подаче напряжения на электрические контакты соленоида. При втягивании шток сжимает надетую на него пружину. Шток и корпус снабжены упорами, посредством которых робот контактирует с внутренней поверхностью трубы. Упоры сконструированы так, что при движении в желаемом направлении трение между упорами и поверхностью меньше, чем при движении в противоположном направлении. Движение робота осуществляется повторением циклов, при выполнении которых шток сначала втягивается соленоидом, а затем выталкивается пружиной из корпуса. При втягивании на соленоид подается напряжение, и корпус движется к штоку вследствие того, что в этом направлении сила трения между упорами и поверхностью трубы меньше, пружина сжимается. При выталкивании с соленоида снимается напряжение, шток движется в направлении от корпуса. Затем выполняется следующий цикл движения.

Внутритрубный реверсивный робот состоит из двух модулей (рис. 3). Модуль 1 предназначен для удержания робота внутри трубы и обладает анизотропией по трению в выбранном направлении. Управляемый упор модуля представляет собой две группы упоров, ориентированных под различными углами к поверхности трубы. Для движения в сторону модуля 1 (вперед) с помощью электродвигателя и передачи типа винт-гайка из корпуса выдвигается группа упоров, отклоненных в сторону модуля 2 (назад). Для движения в обратном направлении эта группа упоров задвигается, и выдвигается группа упоров, наклоненных в сторону модуля 1. Модуль 2 содержит маршевый двигатель, а его трение с внутренней

¹ Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации AAAA-A17-117121120036-3).

поверхностью трубы изотропно. Маршевый двигатель представляет собой соленоид, при подаче напряжения на который шток, соединенный гибкой связью с модулем 1, втягивается в корпус модуля 2, а при снятии напряжения с соленоида шток выталкивается с помощью надетой на него пружины. Центрируется модуль в трубе с использованием упругих пластин, закрепленных на корпусе.

Технические характеристики внутритрубных роботов без возможности и с возможностью реверсивного движения представлены ниже.

Технические характеристики внутритрубного робота

Масса штока, г	5,8
Масса корпуса, г	17,6
Жесткость пружины, Н/м	360
Сила трения при движении вперед, Н	0,536
Сила трения при движении назад, Н	4,234
Длина, мм	50
Диаметр корпуса, мм	13,2
Внутренний диаметр трубы, мм	14
Ход штока, мм	3
Сила втягивания электромагнита, Н	0,8

Технические характеристики робота с возможностью реверсивного движения

Масса первого модуля, г	21,3
Масса второго модуля, г	23,1
Жесткость пружины, Н/м	360
Сила трения при движении вперед первого модуля, Н	0,42
Сила трения при движении назад первого модуля, Н	3,35
Сила трения скольжения второго модуля, Н	0,7
Длина робота, мм	155
Диаметр корпуса, мм	13,2
Внутренний диаметр трубы, мм	14
Ход штока, мм	2
Сила втягивания электромагнита, Н	0,8

Из сравнения характеристик следует, что масса реверсивного робота значительно больше, чем масса робота одностороннего движения, что обусловлено наличием дополнительного модуля с переключаемыми упорами.

Модель динамики роботов

Рассмотрим робот, способный только к одностороннему движению. На шток (рис. 4) действуют следующие силы: электромагнитная сила F , которая втягивает шток в соленоид, сила упругости пружины $k(x_2 - x_1)$, сила тяжести $m_1 g$. На корпус действуют противоположно направленные электромагнитная сила и сила упругости пружины, а также сила тяжести $m_2 g$; k — коэффициент жесткости пружины; x_1, x_2 — координаты штока и корпуса (точки отсчета координат выбраны так, что при $x_1 = x_2$ пружина не деформирована, а в начальный момент времени

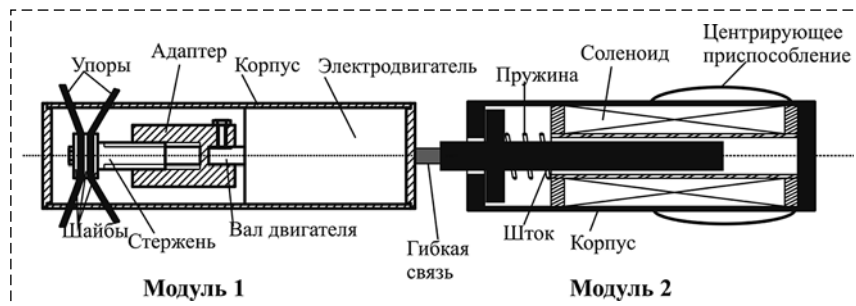


Рис. 3. Внутреннее устройство внутритрубного реверсивного мини-робота

координаты равны нулю); m_1, m_2 — массы штока и корпуса; g — ускорение свободного падения; β — угол наклона оси трубы к горизонту. Также на шток и корпус действуют силы сухого трения $F_{тр}^1$ и $F_{тр}^2$, а также силы сопротивления среды $D_1 \dot{x}_1, D_2 \dot{x}_2$; D_1, D_2 — коэффициенты сопротивления среды.

Уравнения движения робота имеют вид

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

Силы сухого трения будем считать кулоновыми, т.е.

$$F_{тр}^i = \begin{cases} \mu^+ N_i, (\dot{x}_i > 0 \text{ или } \dot{x}_i = 0 \text{ и } R_i \geq \mu^+ N_i); \\ -\mu^- N_i, (\dot{x}_i < 0 \text{ или } \dot{x}_i = 0 \text{ и } R_i \leq -\mu^- N_i); \\ R_i, (\dot{x}_i = 0 \text{ и } -\mu^- N_i \leq R_i \leq \mu^+ N_i), \end{cases} \quad (2)$$

($i = 1, 2$)

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

Координата центра масс робота $x_c = (m_1 x_1 + m_2 x_2) / (m_1 + m_2)$. Уравнение движения центра масс можно получить, сложив уравнения системы (1):

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2) \ddot{x}_c = \\ = -(m_1 + m_2) g \sin \beta - (F_{тр}^1 + F_{тр}^2) - D_1 \dot{x}_1 - D_2 \dot{x}_2. \end{aligned} \quad (3)$$

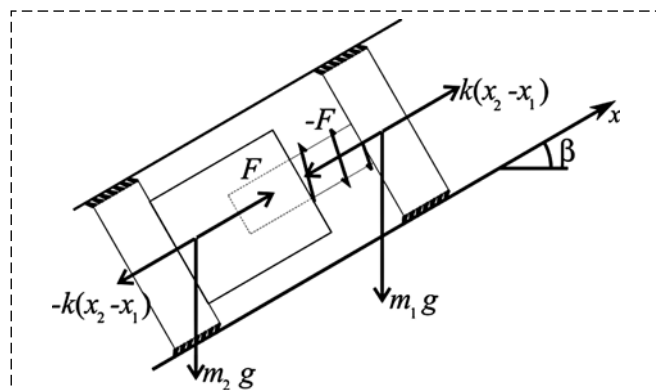


Рис. 4. Силы, действующие на робота (не показаны силы трения и реакции стенок трубы)

Силой, направленной вдоль положительно-го направления оси x , будет член, включающий силы сухого трения. На них накладывается ограничение

$$-\mu^+(N_1 + N_2) \leq -(F_{\text{тр}}^1 + F_{\text{тр}}^2) \leq \mu^-(N_1 + N_2). \quad (4)$$

Таким образом, чем больше отношение μ^-/μ^+ , т.е. чем более анизотропно трение, тем большим тяговым усилием может обладать робот по отношению к силе торможения, вызванной тем же сухим трением. Увеличить анизотропность трения и силу давления на стенки трубы можно за счет подбора материала упоров.

Для описания динамики реверсивного робота применялись уравнения (1), в которых выражение для сил трения имеет следующий вид:

$$F_{\text{тр}}^1 = \begin{cases} \mu^+ N_1, (\dot{x}_1 > 0 \text{ или } \dot{x}_1 = 0 \text{ и } R_1 \geq \mu^+ N_1); \\ -\mu^- N_1, (\dot{x}_1 < 0 \text{ или } \dot{x}_1 = 0 \text{ и } R_1 \leq -\mu^- N_1); \\ R_1, (\dot{x}_1 = 0 \text{ и } -\mu^- N_1 \leq R_1 \leq \mu^+ N_1); \end{cases}$$

$$R_1 = -F + k(x_2 - x_1) - m_1 g \sin \beta - D_1 \dot{x}_1;$$

$$F_{\text{тр}}^2 = \begin{cases} \mu^+ N_2, (\dot{x}_2 > 0 \text{ или } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } R_2 \geq \mu^+ N_2); \\ -\mu^- N_2, (\dot{x}_2 < 0 \text{ или } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } R_2 \leq -\mu^- N_2); \\ R_2, (\dot{x}_2 = 0 \text{ и } -\mu^- N_2 \leq R_2 \leq \mu^+ N_2); \end{cases}$$

$$R_2 = F - k(x_2 - x_1) - m_2 g \sin \beta - D_2 \dot{x}_2.$$

Решение полученных уравнений движения роботов осуществлялось численно в среде MATLAB. Полученные результаты затем сопоставлялись с экспериментом.

Исследовалось движение миниатюрных роботов в трубах малых диаметров в средах с различной вязкостью при отсутствии и наличии избыточного давления в трубе. Повышение вязкости, а также увеличение избыточного давления приводит к снижению скорости движения робота. Графики зависимостей скорости перемещения миниатюрного робота от отношения зазора между корпусом и трубой к диаметру робота при отсутствии избыточного давления в трубе представлены на рис. 5. Цифрами на графиках обозначены различные среды, в которых движется робот: 1 — синтетическое масло, 2 — минеральное масло. Наибольшая скорость перемещения достигается в синтетическом масле. Значительную роль в снижении скорости играет вязкость, а также коэффициент трения упоров, что может привести к проскальзыванию миниатюрного робота. Избыточное давление ведет к снижению скорости движения. На рис. 6 показаны зависимости скорости движения роботов различного диаметра от отношения зазора к диаметру в различных средах при наличии избыточного давления. Исследование зависимости скорости движения робота от внешней возбуждающей силы при различных значениях отношения зазора к диаметру робота позволяет выявить особенности динамики подобных систем. В представленной на рис. 7, а номограмме приведена зависимость скорости движения робота диаметром 10 мм в минеральном масле от отношения зазора между корпусом робота и трубой к его диаметру и от тягового усилия при отсутствии избыточного давления. На рис. 7, б представлена зависимость скорости этого же робота от отношения зазора к диаметру и от избыточного давления в трубе при постоянном тяговом усилии. Сравнение ре-

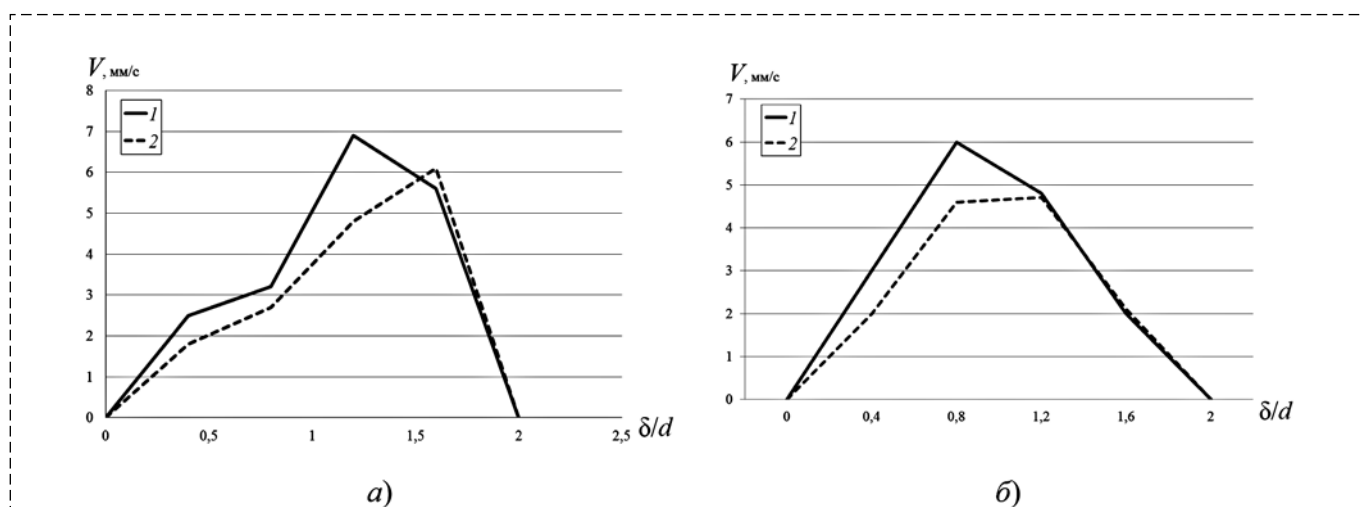


Рис. 5. Зависимость скорости движения минироботов от отношения зазора к диаметру робота в вязкой среде при отсутствии избыточного давления и электромагнитной силе 0,2 Н для диаметров 10 мм (а) и 5 мм (б):

1 — синтетическое масло; 2 — минеральное масло

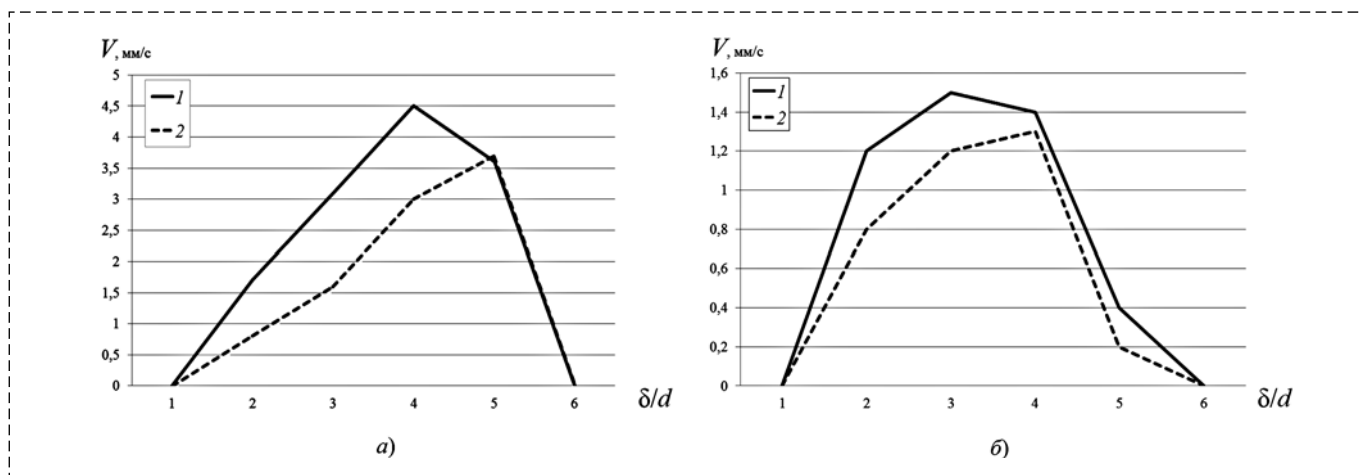


Рис. 6. Зависимость скорости движения минироботов от отношения зазора к диаметру робота в вязкой среде при наличии избыточного давления 8 кПа:

a — диаметр робота 10 мм, электромагнитная сила 0,25 Н; *б* — диаметр 5 мм, электромагнитная сила 0,125 Н; 1 — синтетическое масло, 2 — минеральное масло

зультатов исследования движения миниатюрных роботов диаметрами 5 и 10 мм в среде с заданной вязкостью (минеральное масло) при отсутствии избыточного давления показало, что значение максимального тягового усилия робота диамет-

ром 10 мм в 1,6 раза больше, чем тяговое усилие робота диаметром 5 мм.

Результаты исследования динамики

Влияние колебаний на функциональные характеристики роботов изучали путем численного моделирования уравнений (1)–(4) и проведения экспериментов с образцами роботов. Вблизи резонанса увеличивается амплитуда колебаний корпуса и штока, вследствие чего достигается полный ход штока. Поэтому реальная скорость в области резонанса меньше расчетной. Приведенные в статье результаты моделирования были получены для значений $D_1 = D_2 = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}$, $\beta = \pi/2$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. На рис. 8 показана теоретическая зависимость максимального хода штока ΔX от периода действия электромагнитной

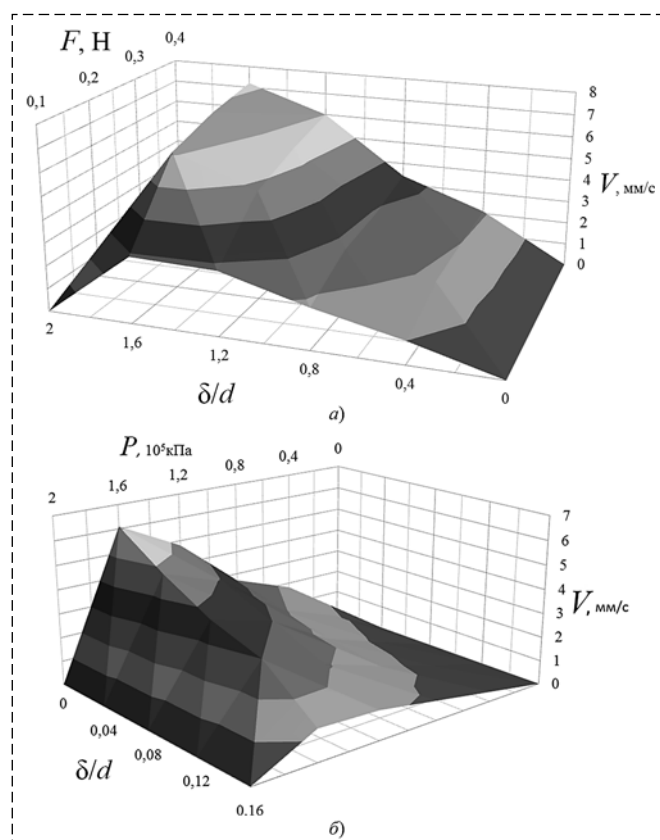


Рис. 7. Зависимость скорости движения миниробота в минеральном масле:

a — от тягового усилия и отношения зазора к диаметру миниробота при отсутствии избыточного давления; *б* — от избыточного давления и отношения зазора к диаметру миниробота при постоянном тяговом усилии

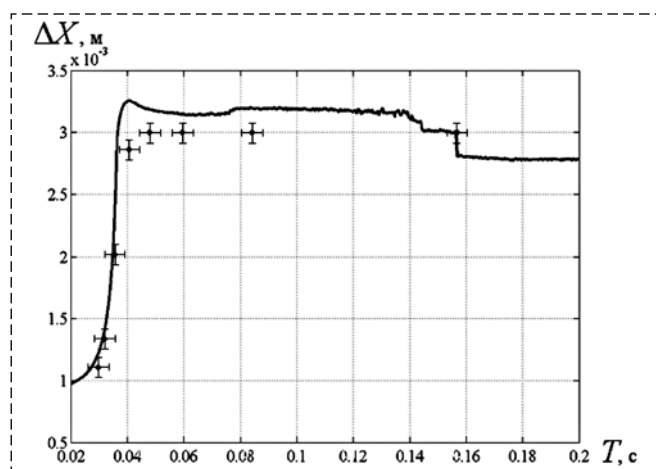


Рис. 8. Зависимость расстояния между штоком и корпусом от периода

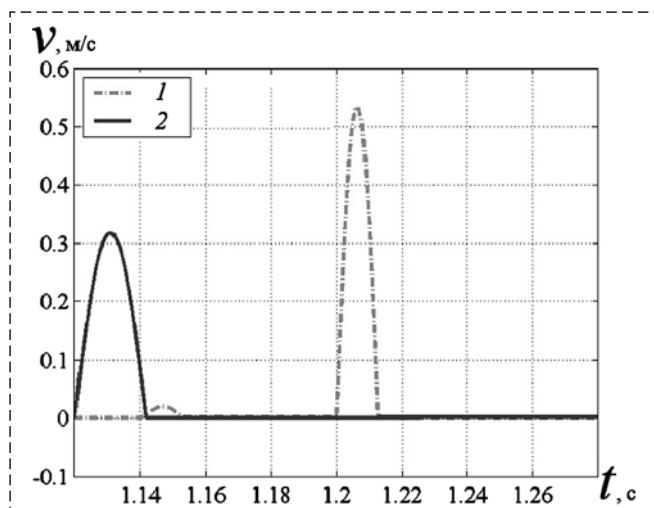


Рис. 9. Изменение скоростей штока и корпуса за период:
1 — скорость штока; 2 — скорость корпуса

силы, точками показаны экспериментальные значения с указанием погрешности измерений. Рассмотрим движение корпуса и штока в течение одного периода ($T = 0,16$ с) установившегося движения (рис. 9). Наблюдаются участки, когда и шток, и корпус находятся в покое. Обозначим q — отношение времени действия электромагнитной силы за период к периоду. Тогда скважность импульса равна $1 - q$. Меняя q , можно избежать простаивания. Это увеличит скорость движения робота.

На рис. 10 (см. вторую сторону обложки) показана зависимость средней за период скорости движения робота V от частоты действия электромагнитной силы и протяженности ее импульса. Анализ полученной зависимости показывает, что максимальное значение скорости достигается при определенном периоде воздействий и

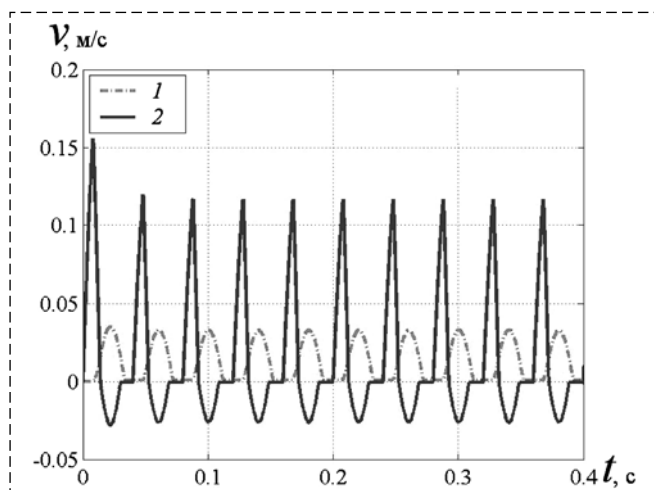


Рис. 11. Зависимость скоростей штока и корпуса внутритрубного миниробота с управляемыми упорами от времени:
1 — скорость штока; 2 — скорость корпуса

определенной скважности импульса. С помощью представленной модели можно определить q и T , при которых достигается максимальная скорость движения робота с требуемой точностью. Зависимости скоростей (v) штока (1) и корпуса (2) миниатюрного внутритрубного робота с управляемыми упорами от времени представлена на рис. 11 ($T = 0,16$ с). Зависимость скорости робота с управляемыми упорами от частоты электрических импульсов и их длительности (рис. 12, см. вторую сторону обложки) иллюстрирует связь между функциональными свойствами робота с управляемыми упорами.

Заключение

Рассмотрено движение миниатюрных роботов в трубах малых диаметров. Анализируется движение таких роботов в средах с различной вязкостью (синтетическое и минеральное масло). Показано влияние вынужденных колебаний разных частот на функциональные характеристики миниатюрных внутритрубных роботов электромагнитного принципа действия, оборудованных анизотропными устройствами сцепления с внутренними поверхностями труб малых диаметров. Наибольшее внимание уделено исследованию силовых воздействий на роботов и влиянию колебаний на их скорость движения.

Список литературы

1. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Фомин Л. Ф., Чашухин В. Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 271 с.
2. Madou M. Fundamentals of microfabrication — Boca Raton: CRC Press, 1997. 723 p.
3. Чашухин В. Г. Исследование устройств сцепления с поверхностью мобильных роботов, имеющих адгезионные материалы на контактных площадках. М., 2008. 27 с. (Препринт ИПМех РАН, № 861).
4. Sitti M. Micro- and nano- scale robotic // ASME Report / Carnegie Mellon University, Pittsburg, 2006. 8 p.
5. Ильясов Б. Г., Даринцев О. В., Мунасыпов Р. А. Основы микроробототехники. Уфа: УГАТУ, 2004. 161 с.
6. The MEMS Handbook. Edited by Mohamed Gad-el-Hak. Boca Raton: CRC Press, 2002. P. 17—59.
7. Wang Z., Appleton E. The concept and research of a pipe crawling rescue robot // Advances Robotics. 2003. Vol. 17, N. 4. P. 339—358.
8. Suzumori Z., Wakimoto S., Takada M. A miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter // Proc. of the 2003 IEEE International Conference of Robotics & Automation (Taipei, Taiwan, 2003). P. 2735—2740.
9. Anthierens C., Betemps M. Design and control of a pneumatic microrobot for in-pipe inspection of nuclear pipes // Journal of Mechatronics. 2001. Vol. 1, N. 2. P. 155—174.

Studying the Dynamics of Miniature in-Pipe Vibration Type Robots

V. G. Gradetsky, Principal Researcher, gradet@ipmnet.ru,

V. G. Chashchukhin, Senior Researcher, ketlk@mail.ru,

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: **Gradetsky Valery G.**, Ph. D., Principal Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Prospekt Vernadskogo, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: gradet@ipmnet.ru

Accepted on January 26, 2018

Actual problem is the study of oscillation acting on functional characteristics of miniature robots based on frequency modulation and changing of pulse recurrence frequency. Such robots are the systems with electromagnetic action, investigation of which is performing in many scientific centers of the world. Study of oscillation processes satisfy the receiving of relationships between functional and frequency characteristics, determine conformity working and required parameters and to extend robot's possibilities. Miniature robots with electromagnetic drive system and technological on board sensors are intended mainly for direct or inverse motion inside of pipes with small diameter (5—20 mm) and analyze of the quality internal surfaces of the pipes, for nondestructive testing and other inspection operations in energy, nuclear power stations for example, in aviation and space technologies. In this paper the motion equations of electromagnetic in-pipe robot are presented, as so as nomographs and characteristics, those may use under design of miniature robots for the purposes of target applications. The results of investigations of oscillatory processes in miniature in-pipe robots of the electromagnetic principle of action are presented. Robots are equipped with coupling devices with internal surfaces of small diameter pipes. Dependences of the robot's parameters on the frequency, length and duration of the control pulses are given. The oscillations effects for a different frequency on the characteristics of the robot with the possibility of reversible motion when moving in media of different viscosities are analyzed.

Keywords: miniature robot, electromagnetic principle of action, oscillation processes, coupling devices, small diameter pipes

Acknowledgements: This work was done on the theme of the state task (State Registration No AAAA-A17-117121120036-3).

For citation:

Gradetsky V. G., Chashchukhin V. G. Studying the Dynamics of Miniature in-Pipe Vibration Type Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 6, pp. 396—401.

DOI: 10.17587/mau.19.396-401

References

1. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Fomin L. F., Chashchukhin V. G. *Mekhanika miniaturnykh robotov* (Miniature robots mechanics), Moscow, Nauka, 2010, 271 p. (in Russian)
2. Madou M. Fundamentals of microfabrication, Boca Raton, CRC Press, 1997, 723 p.
3. Chashchukhin V. G. *Issledovanie ustroystv sopleleniya s poverhnost'yu mobil'nykh robotov, imeyushchih adgezionnye materialy na kontaktnykh ploshchadkakh* (The study of the devices of adhesion

to the surface of mobile robots with adhesive materials on contact surfaces), Moscow, 2008, *Preprint IPM RAS*, № 861, 27 p. (in Russian).

4. Sitti M. Micro- and nano- scale robotic, ASME Report, Carnegie Mellon University, Pittsburg, 2006, 8 p.

5. Il'jasov G., Darincev O., Munasypov R. *Osnovy mikro-robototekhniki* (Basics of robotics), Ufa, UGATU, 2004, 161 p. (in Russian).

6. **The MEMS Handbook**. Edited by Mohamed Gad-el-Hak, Boca Raton, CRC Press, 2002, pp. 17—59.

7. Wang Z., Appleton E. The concept and research of a pipe crawling rescue robot, *Advances Robotics*, 2003, vol. 17, no. 4, pp. 339—358.

8. Suzumori Z., Wakimoto S., Takada M. A miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter, *Proc. of the 2003 IEEE International Conference of Robotics & Automation*, Taipei, Taiwan, 2003, pp. 2735—2740.

9. Antheierens C., Betemps M. Design and control of a pneumatic microrobot for in-pipe inspection of nuclear pipes, *Journal of Mechatronics*, 2001, vol. 1, no. 2, pp. 155—174.