

УДК 538.3

DOI 10.24412/2413-7383-2024-1-63-74

О. А. Бутов

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118 б

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА АДАПТАЦИИ ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА К ДИАМЕТРУ ТРУБЫ И РЕГУЛИРОВКИ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВСЕНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕС

O. A. Butov

Federal State Budgetary Scientific Institution
"Institute of Artificial Intelligence Problems", Donetsk
283048, Donetsk, Artyom str., 118 b

INVESTIGATION OF THE MECHANISM OF ADAPTATION OF AN IN-TUBE ROBOT TO THE DIAMETER OF THE PIPE AND ADJUSTMENT OF TRACTION FORCE WHEN USING OMNIDIRECTIONAL WHEELS

В данной статье исследованы параметры работы механизма адаптации к диаметру трубы внутритрубного колесного робота, работающего по принципу «в распор». При применении данной методики определены сила и крутящий момент на ходовом винту механизма, необходимые для контакта колес с внутренней поверхностью трубы и последующей регулировки тягового усилия колесного робота с параллельным механизмом. Это достигается при помощи датчика давления.

Ключевые слова: механизм адаптации, колесный робот, всенаправленное колесо, труба, сила, крутящий момент, тяговое усилие, датчик давления

In this article, the parameters of the operation of the mechanism of adaptation to the pipe diameter of an in-tube wheeled robot operating on the principle of "spacer" are investigated. When applying this technique, the force and torque on the running screw of the mechanism necessary for the wheels to contact the inner surface of the pipe and subsequent adjustment of the traction force of a wheeled robot with a parallel mechanism are determined. This is achieved using a pressure sensor.

Keywords: adaptation mechanism, wheeled robot, omnidirectional wheel, pipe, force, torque, traction force, pressure sensor

Введение

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. Согласно классификации [1-3] одним из них является колесный внутритрубный робот с активной адаптацией к диаметру трубы, электроприводом и симметричным расположением механизмов. На рисунке 1 показаны твердотельная модель 1а и прототип 1б такого робота.

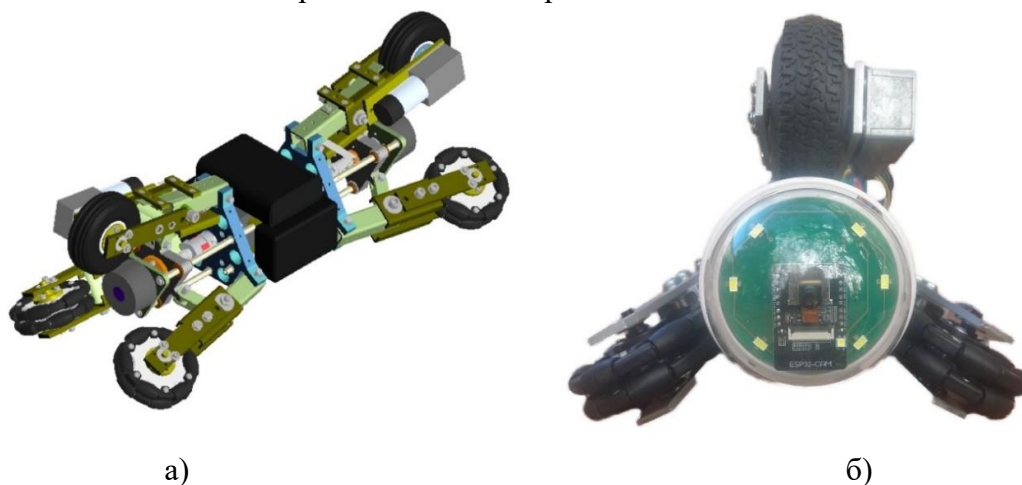


Рисунок 1 – Робот для внутритрубной инспекции: а) твердотельная 3d-модель; б) прототип

Для него вместо привычных колес применим всенаправленные колеса, которые будут служить опорными. Ведущие оставим прежними. Всенаправленное колесо определяется как стандартное колесо, снабженное массивом роликов, оси которых развернуты перпендикулярно нормальному направлению колеса. Внешний вид такого колеса [4] показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Всенаправленное колесо

Их использование уменьшит негативные воздействия на элементы конструкции робота от воздействия поперечных сил при адаптации к диаметру трубы, а также позволит удерживать робот от проворота вокруг центральной оси при его движении внутри трубы.

Кроме использования оборудования для визуального осмотра трубопровода, такого как ПЗС(ССD) и КМОП(СMOS) матрицы он может использоваться платформой различного рода датчиков для неразрушающего контроля стенок трубы технологией измерения утечки магнитного потока(MFL) и (или) ультразвукового контроля (UT) [5-9].

Обзор и конструкция робота

Робот весом 5,5 кг может изменять свои габариты от 230 до 300 мм. В сочетании с аккумулятором он может работать более 120 минут со скоростью 4,5 м/мин. Исследование движения робота основано на его геометрии, с учетом следующих ограничений:

- При адаптации робота к диаметру трубы робот опорными колесами движется по цилиндрической поверхности;
- При регулировке тягового усилия робот всеми колесами движется прямолинейно по плоской поверхности;
- Фрикционный нагрев не учитывается;
- Гибкие компоненты конструкции не учитываются.

На рис. 3 показана часть робота, осуществляющая его адаптацию к диаметру трубы и регулировку тягового усилия. Весь исполнительный механизм состоит из двух таких частей, соединенных между собой «зеркально» (рис. 1). Работа механизма: регулирующий двигатель, создавая крутящий момент T , через ходовой винт перемещает гайку с силой F вдоль центральной оси робота, при этом (шарнирно соединенный в точках В и С) шатун ВС перемещает рычаг AD вверх (вниз) через цилиндрический шарнир в точке А. Опорные двунаправленные колеса устроены аналогично, и расположены под углом 120° относительно центральной оси робота (рис. 4). Происходит распор робота в трубе и через двойной шарнир в т. В и рычаг L_3 осуществляется косвенное измерение прижима колес к трубе через датчик давления. В начале этого процесса, поскольку центральная ось робота не пересекается с центральной осью трубы, как показано на рис. 4, требуется дополнительный крутящий момент для преодоления сопротивления, вызванного поперечным трением стенки трубы с колесами, компенсирующий силу тяжести. Чтобы уменьшить это влияние мы и применим двунаправленные колеса.

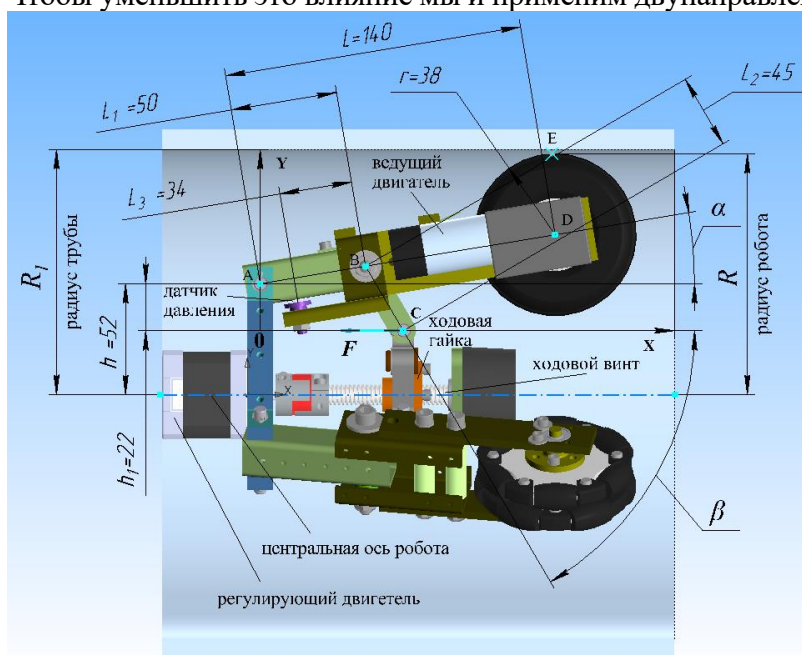


Рисунок 3 – Часть механизма робота

На рис. 3: R – радиус робота; R_1 – радиус трубы; h – высота от оси поворота рычага AD до центральной оси робота; h_1 – высота от шарнира поворота шатуна BC до оси поворота рычага AD робота по оси Y ; r – радиус колеса; L – расстояние от оси поворота рычага до оси вращения колеса, рычаг AD ; L_1 – расстояние от оси поворота рычага AD до двойного шарнира соединения шатуна BC с рычагом AD ; L_2 – расстояние от двойного шарнира шатуна до шарнира плиты крепления ходовой гайки, длина шатуна BC ; α – угол между рычагом AD и осью X ; β – угол между шатуном BC и осью X ; F – осевая сила, вызванная крутящим моментом T ходового винта;

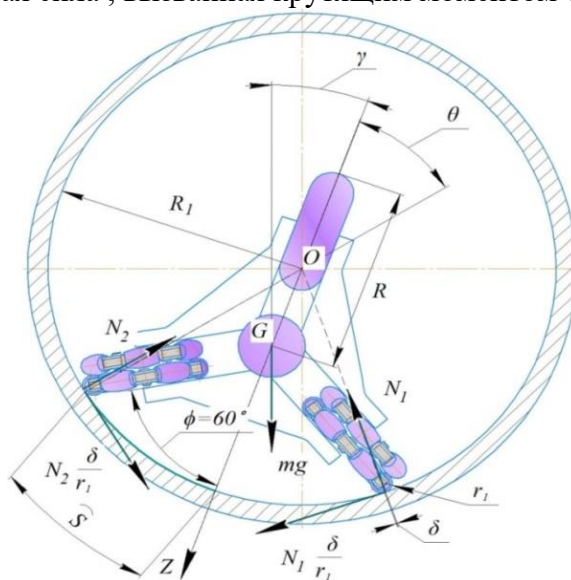


Рисунок 4 – Схема действия сил

На рис. 4: G – центр тяжести расположенный на центральной оси робота, т.к. конструкция робота симметрична; mg – сила тяжести действующая на робота, масса робота – 5,5 кг; γ – угол ориентации робота относительно центральной оси трубы; N_1 и N_2 – опорные реакции действующие на опорные колесные пары под действием силы тяжести; θ – угол между осью Z и линией соединяющей опорную точку с центром трубы; s – длина дуги угла θ ; z – координата G на ось Z ; δ – коэффициент трения качения ролика двунаправленного колеса о стенку трубы, для пары полимер – сталь 0,002 м[10]; r_1 – радиус ролика двунаправленного колеса – 0,00625 м.

Методология исследования

Для исследования механизма адаптации к диаметру и регулировки тягового усилия робота, воспользуемся математическим моделированием данной системы и полученные результаты применим для определения и уточнения характеристик используемых в физическом образце-прототипе элементов [11].

Механическая модель активной адаптации к диаметру трубы. Согласно приведенных выше рис. 3 и 4 запишем следующие геометрические отношения:

$$\begin{cases} R = r + h + L \sin \alpha \\ x = L_1 \cos \alpha + L_2 \cos \beta \\ L_1 \sin \alpha = L_2 \sin \beta - h_1 \\ s = R_1 \theta \\ R \sin \phi = R_1 \sin \theta \\ z \sin \phi = R_1 \sin(\phi - \theta) \end{cases} \quad (1)$$

где x – координата точки C (см. рис.3) на оси X . Используя основное тригонометрическое тождество и замену для угла θ получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} x = L_1 \sqrt{1 - \frac{(R-r-h)^2}{L^2}} + L_2 \sqrt{1 - \left(\frac{h_1}{L_2} + \frac{L_1(R-r-h)}{LL_2} \right)^2} \\ s = R_1 \sin^{-1} \left(\frac{R \sin \phi}{R_1} \right) \\ z = \frac{R_1 \sin \left(\phi - \sin^{-1} \left(\frac{R \sin \phi}{R_1} \right) \right)}{\sin \phi} \end{cases} \quad (2)$$

Дифференцируя обе части уравнений 2, получаем [5]:

$$\begin{cases} dx = -\frac{L_1}{L} \left(\frac{R-r-h}{\sqrt{L^2 - (R-r-h)^2}} + \frac{h_1 L + L_1(R-r-h)}{\sqrt{L^2 L_2^2 - (h_1 L + L_1(R-r-h))^2}} \right) dR \\ ds = \frac{R_1 \sin \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} dR \\ dz = - \left(\cos \phi + \frac{R \sin^2 \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \right) dR \end{cases} \quad (3)$$

Исходя из первой формы условий равновесия произвольной системы сил, преобразуя $\cos \theta$ через $\sin \theta$ (1) мы можем получить:

$$\begin{cases} \sum N = N_1 + N_2 = \frac{mg \cos \phi \cos \gamma}{\cos \theta} = \frac{mg \cos \phi \cos \gamma R_1}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \\ F dx + \frac{\delta}{r_1} \sum N ds = mg dz \cos \phi \cos \gamma \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $\sum N$ сумма реакций сил на опорные колеса. Введем вместо dx , ds , dz и $\cos \theta$ следующие обозначения:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{L_1}{L} \left(\frac{R-r-h}{\sqrt{L^2 - (R-r-h)^2}} + \frac{h_1 L + L_1(R-r-h)}{\sqrt{L^2 L_2^2 - (h_1 L + L_1(R-r-h))^2}} \right) \\ k_2 = \frac{R_1 \sin \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \\ k_3 = \cos \phi + \frac{R \sin^2 \phi}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \\ k_4 = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 - R^2 \sin^2 \phi}} \end{cases} \quad (5)$$

И подставим их в уравнение 4, тогда имеем следующую зависимость силы F от радиуса робота R :

$$F = \frac{mg \cos \phi \cos \gamma}{k_1} \left(k_2 k_4 \frac{\delta}{r_1} + k_3 \right) \quad (6)$$

Выходной крутящий момент регулирующего двигателя связан с силой F формулой:

$$T = \frac{P_h}{2\pi\eta} F = \frac{P_h}{2\pi\eta} \cdot \frac{mg \cos \phi \cos \gamma}{k_1} \left(k_2 k_4 \frac{\delta}{r_1} + k_3 \right) \quad (7)$$

Где P_h шаг – ходового винта линейной передачи, а η – к.п.д. передачи, для резьбы Tr 10 x 2 – 7е пары скольжения винт-гайка - 28% [6].

На рис. 5 показаны графики значений силы F (рис. 1) и крутящего момента T регулирующего двигателя, необходимые для осуществления положения «в распор» нашего робота в трубе с внутренним диаметром 230-300 мм.

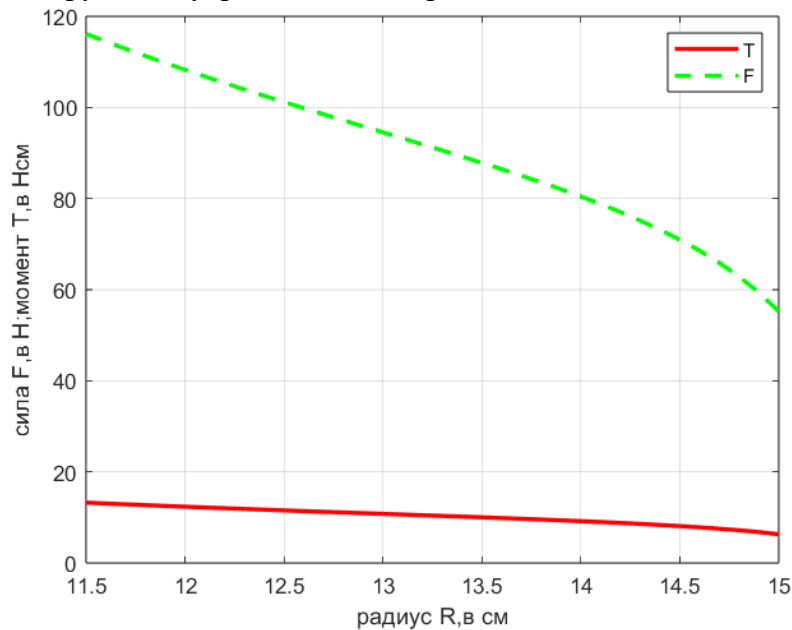


Рисунок 5 – Значения силы на ходовом винте и момент регулирующего двигателя прототипа робота при адаптации его к размерам трубы

Механическая модель регулирования тягового усилия. Для реализации управления тяговой силой F_T , необходимо установить ее механическую модель на основе анализа взаимосвязей между тяговой силой F_T , дополнительным давлением P , силой F на ходовом винте и выходным крутящим моментом регулирующего двигателя T .

Определим сумму всех давлений, приложенных к ведущим колесам весом робота, как общую поддерживающую силу обозначается символом $\sum N$, а сумма давлений, создаваемых механизмом адаптации, учитываем как дополнительное давление обозначается символом $\sum P$. Как показано на рис. 5, центральная ось робота почти перекрывает центральную ось трубы при регулировке тягового усилия.

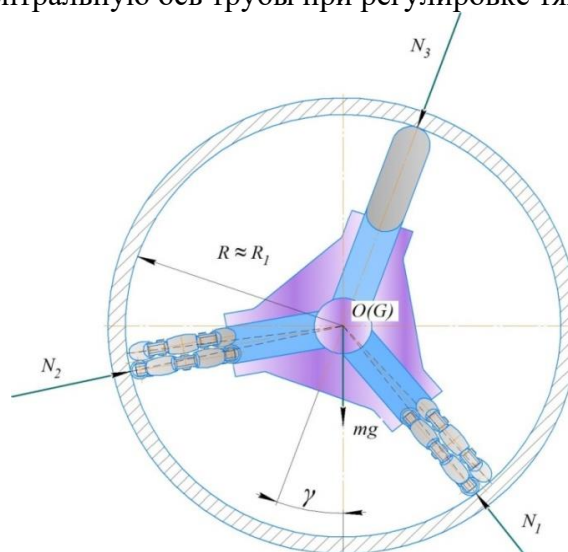


Рисунок 6 – Схема сил реакций опор

Так как колеса расположены под углом 120° , то в преодолении силы тяжести участвуют только одна или две из трех. Определим, что ориентация против часовой стрелки положительна, а ориентация по часовой стрелке отрицательна. Тогда имеем:

$$\begin{cases} N_3 = 0 & -60^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ \\ N_1 = 0 & 60^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \\ N_2 = 0 & 180^\circ \leq \gamma \leq 300^\circ \end{cases} \quad (8)$$

Запишем, исходя из условия равновесия сил:

$$\begin{cases} N_1 \cos(\gamma + 60^\circ) + N_2 \cos(60^\circ - \gamma) = mg \\ N_1 \sin(\gamma + 60^\circ) - N_2 \sin(60^\circ - \gamma) = 0 \end{cases} \quad -60^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ$$

$$\begin{cases} N_2 \cos(\gamma - 60^\circ) - N_3 \cos \gamma = mg \\ N_2 \sin(\gamma - 60^\circ) - N_3 \sin \gamma = 0 \end{cases} \quad 60^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \quad (9)$$

$$\begin{cases} -N_3 \cos \gamma + N_1 \cos(60^\circ + \gamma) = mg \\ -N_3 \sin \gamma + N_1 \sin(60^\circ + \gamma) = 0 \end{cases} \quad 180^\circ \leq \gamma \leq 300^\circ$$

Отсюда решение уравнения (9) с учетом угла ϕ для $\sum N$ будет:

$$\sum N = \begin{cases} 2mg \cos \gamma \cos \phi \\ 2mg \cos(\gamma - 120^\circ) \cos \phi \\ 2mg \cos(\gamma - 240^\circ) \cos \phi \end{cases} \quad (10)$$

Если робот осуществляет движение в трубе, то сила тяги его достаточна и может быть записана как:

$$F_T = (\sum N + \sum P) \mu, \quad (11)$$

где μ – коэффициент сцепления колес с трубой.

Согласно рис. 3 имеем следующие геометрические соотношения:

$$\begin{cases} R = r + h + L \sin \alpha \\ y = R - h + h_1 \\ x = L_1 \cos \alpha + L_2 \cos \beta \\ L_1 \sin \alpha = L_2 \sin \beta - h_1 \end{cases}, \quad (12)$$

где x — координата точки С на оси X, y — координата точки Е на оси Y.

Дифференцируя обе стороны уравнения 12 (аналогично дифференцированию уравнению 1), получаем:

$$\begin{cases} \delta y = \delta R \\ \delta x = -k_1 \delta R \end{cases} \quad (13)$$

Применение принципа виртуальных перемещений дает (принцип виртуальных перемещений определяет условия равновесия механической системы, на которую наложены идеальные связи: для того, чтобы механическая система, на которую наложены идеальные, стационарные и удерживающие связи, находилась в равновесии, необходимо и достаточно, чтобы сумма виртуальных работ всех активных сил на любом из виртуальных перемещений системы была равна 0):

$$(\sum N + \sum P) \delta y + F \delta x = 0 \quad (14)$$

Подставляя уравнение (13) в уравнение (14), получаем

$$F = \frac{1}{k_1} (\sum N + \sum P) = \frac{1}{k_1 \mu} F_T \quad (15)$$

Тогда требуемый выходной крутящий момент регулирующего двигателя можно записать:

$$T = \frac{P_h}{2\pi\eta} F = \frac{P_h}{2\pi\eta} \cdot \frac{1}{k_1 \mu} F_T \quad (16)$$

здесь: μ - коэффициент сцепления между ведущими колесами и стенкой трубы, $\mu=0,6$; тяговое усилие нашего прототипа $F_T = 53$ Н.

Механическая модель регулировки тяговой силы состоит из уравнений. (10), (11), (15) и (16), которые описывают изменения силы F , выходного момента T регулирующего двигателя (см. рис.7), дополнительное давление ΣP и тяговое усилие F_T .

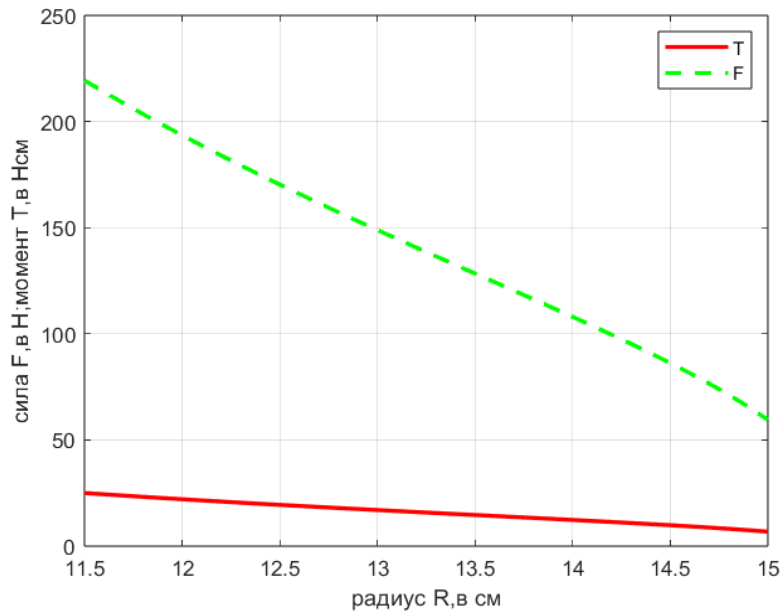


Рисунок 7 – Значения силы на ходовом винте и момент регулирующего двигателя прототипа робота при регулировании тягового усилия робота по отношению к размерам трубы

Регулировка тягового усилия. Из уравнения (5) первая производная от k_1 по R равна:

$$\frac{dk_1}{dR} = \frac{L_1}{L} \left(\frac{\frac{1}{\sqrt{L^2 - (R-r-h)^2}} + \frac{L_1}{\sqrt{L^2 L_2^2 - (L_1(R-r-h) + h_1 L)^2}}}{\frac{(R-r-h)^2}{(L^2 - (R-r-h)^2)^{3/2}} + \frac{L_1(L_1(R-r-h) + h_1 L)^2}{(L^2 L_2^2 - (L_1(R-r-h) + h_1 L)^2)^{3/2}}} \right) \quad (17)$$

Подставляя уравнение (17) в первую производную уравнения (15) по отношению к R и имея тяговое усилие имеем следующие отношения

$$\begin{cases} \frac{dF}{dR} = \frac{dF}{dk_1} \frac{dk_1}{dR} = - \frac{(\Sigma N + \Sigma P)}{k_1^2} \frac{dk_1}{dR} < 0 \\ \frac{dT}{dR} = \frac{P_h}{2\pi\eta} \frac{dF}{dR} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

Поскольку у нас в процессе регулировки тяговой силы $R \approx R_1$, уравнение (18) показывает, что для создания постоянной силы тяги F_T требуется изменение выходного крутящего момента T регулирующего двигателя в случае изменения диаметра трубы, и как F , так и T уменьшаются по мере увеличения диаметра трубы.

В соответствии с приведенной выше механической моделью регулировки тягового усилия легко понять, что робот может регулировать свою тяговую силу фактически за счет регулировки дополнительного давления колес на стенки трубы. Изменение давления является эффективным способом повышения тяговой способности робота, но по мере увеличения дополнительного давления нагрузка, распределяемая на соот-

ветствующие компоненты и ведущий двигатель робота, также увеличивается. Поэтому диапазон регулировки должен быть определен фактическими требованиями конструкции робота.

Зависимость оптимального угла наклона γ от веса робота. Для этого используем уравнение 10, введя так называемый индекс веса I_{mg} , как отношение опорных реакций колес к весу, который показывает, насколько вес робота влияет на его тяговую мощность:

$$I_{mg} = \frac{\sum N}{mg} = \begin{cases} 2 \cos \gamma \cos \phi & -60^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ \\ 2 \cos(\gamma - 120^\circ) \cos \phi & 60^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \\ 2 \cos(\gamma - 240^\circ) \cos \phi & 180^\circ \leq \gamma \leq 300^\circ \end{cases} \quad (19)$$

уравнение 19 показывает, что коэффициент использования веса I_{mg} определяется углом наклона γ инспекционного робота. Эта взаимосвязь показана на рис. 8. Очевидно, что положение робота при перемещении внутри трубопровода может в определенной степени влиять на его тяговую способность. Этот эффект зависит от коэффициента использования веса инспекционного робота. Следовательно, инспекционный робот должен поддерживать один оптимальный угол ориентации $\gamma = 0$, $\gamma = 120$ и $\gamma = 240$, чтобы эффективно использовать свой вес для максимально возможного повышения тяговой способности при движении внутри трубопровода.

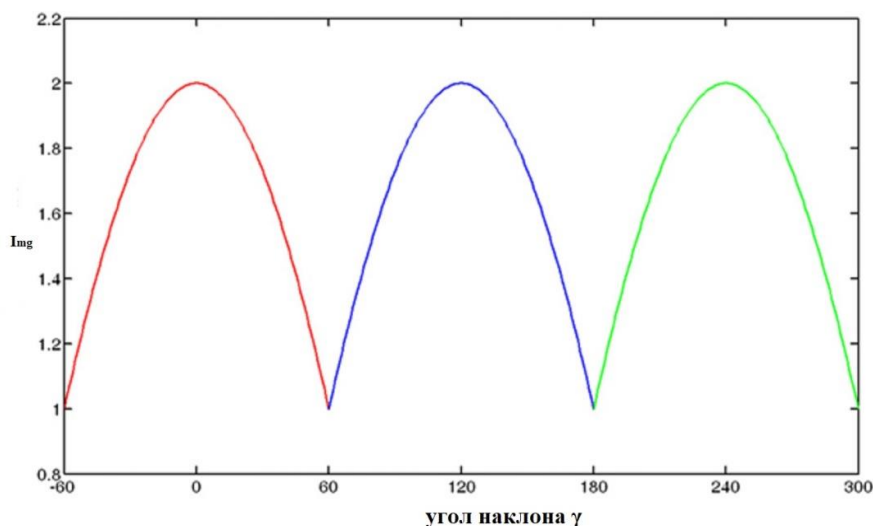


Рисунок 8 – Изменение индекса использования веса в зависимости от угла ориентации

Выводы

В нашем прототипе в качестве регулирующих двигателей (рис. 9) используются шаговые двигатели 17HS4401 имеющие следующие характеристики [14], [15]:

- Номинальный ток – 1,7 А;
- Максимальный крутящий момент – 54 Н·см;
- Момент удержания – 27,5 Н·см;
- Индуктивность фазы – 2,8 мГн;
- Сопротивление фазы - 1,5 Ом;
- Число фаз – 2.



Рисунок 9 – Регулирующий двигатель

Сравнивая значения крутящего и удерживающего моментов с рассчитанными по данной методике (рис. 5 и 7 соответственно), мы видим, что выбранная модель регулирующего двигателя полностью удовлетворяет.

Также на основе данной методики может быть создана программа для расчета геометрических параметров конструктивных элементов робота данной конструкции (диаметров колес, размеров рычагов, шатунов и длины ходового винта) относительно диаметра исследуемой трубы и параметров регулирующего двигателя.

Список литературы

1. Ворочаева, Л.Ю., Савин, С.И. Классификационные признаки роботов, перемещающихся по трубам. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2018, №3.
2. Archila, J.F.; Becker, M.; Soc, I.C. Study of Robots to Pipelines, Mathematical Models and Simulation. In *Proceedings of the 2013 Latin American Robotics Symposium and Competition, Arequipa, Peru, 21–23 October 2013*; IEEE Computer Soc: Los Alamitos, CA, USA, 2013; pp. 18–23.
3. Ren, T.; Zhang, Y.; Li, Y.; Chen, Y.; Liu, Q. Driving Mechanisms, Motion, and Mechanics of Screw Drive In-Pipe Robots: A Review. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2514. [CrossRef]
4. 1 шт. всенаправленное колесо 60 мм всенаправленное колесо 75 мм всенаправленное колесо мобильные шины для комплекта запчастей Робота автомобиля - купить по выгодной цене | AliExpress.
5. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.11.13 / Алехин Сергей Геннадиевич. Москва, 2013. 34 с. Место защиты: Науч.-исслед. ин-т интроскопии МНПО «Спектр». Текст: непосредственный.
6. Choi, H.; Ryew, S. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines. *Mechatronics* 2002, 12, 713–736. [CrossRef]
7. Kim, D.K.; Yoo, H.R.; Yoo, J.S.; Kim, D.K.; Cho, S.H.; Koo, S.J.; Woo, R.Y.; Jung, H.K. Development of MFLSystem for In-Pipe Robot for Unpiggable Natural Gas Pipelines. In *Proceedings of the 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, Jeju, Korea, 30 May 2013; IEEE: New York, NY, USA, 2013; pp. 51–54.
8. ULTRASONIC METAL LOSS INSPECTION (UT). *Pipecare*: [site]. URL: <https://www.pipecaregroup.com/ultrasonic-inspection/> (дата обращения: 14.10.2022). Text: electronic.
9. Комбинированные магнитно-ультразвуковые дефектоскопы (MFL+WM+CD). *Диаскан-Транснефть*: [сайт]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section_file/239869/07_kombinirovannie_magnitno-ultrazvukovie_defektoskopi_jpg (дата обращения: 14.10.2022). – Текст: электронный.
10. Джонсон, К. Л. Главы 4-6, 8, 9. *Механика контактного взаимодействия = Contact Mechanics* / Р.В. Гольдштейн. 1-е. Москва: Мир, 1989. 510 с. ISBN 5-03-000994-9.
11. Zhang Y. In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting / Y. Zhang, G. Yan /. *Mechanism and Machine Theory* 42 (2007) 1618–1631.
12. Калькулятор онлайн - Найти (с решением) производную функции (math-solution.ru).

13. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / Анурьев В.И. Том 2, с. 773. Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 2006 г.
14. 17HS4401: Характеристики и обзор шагового двигателя Nema 17 | Wiki (gistroy.ru)
15. 4-проводной шаговый двигатель Nema17, 42 Мотор Nema 17, двигатель 1,5 А 38 мм (17HS4401) для 3D-принтера и CNC XYZ – купить по выгодной цене | AliExpress

References

1. Vorochaeva, L.Yu., Savin, S.I. Classification features of robots moving along pipes. Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, No. 3.
2. Archila, J.F.; Becker, M.; Soc, I.C. Study of Robots to Pipelines, Mathematical Models and Simulation. In Proceedings of the 2013 Latin American Robotics Symposium and Competition, Arequipa, Peru, October 21-23, 2013; IEEE Computer Soc: Los Alamitos, CA, USA, 2013; pp. 18-23.
3. Ren, T.; Zhang, Y.; Li, Y.; Chen, Y.; Liu, Q. Driving Mechanisms, Motion, and Mechanics of Screw Drive In-Pipe Robots: A Review. Appl. Sci. 2019, 9, 2514. [CrossRef]
4. 1pcs omnidirectional wheel 60mm omnidirectional wheel 75mm omnidirectional wheel mobile tires for Robot car parts kit - buy at a bargain price | AliExpress.
5. Thickness measurement of metal structures based on electromagnetic-acoustic conversion in a pulsed magnetic field : thesis abstract for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.11.13 / Alekhin Sergey Gennadievich. Moscow, 2013. 34 с. Place of defense: Research institute of introscopy MNPO "Spektr". Text: direct.
6. Choi, H.; Ryew, S. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines. Mechatronics 2002, 12, 713-736. [CrossRef]
7. Kim, D.K.; Yoo, H.R.; Yoo, J.S.; Kim, D.K.; Cho, S.H.; Koo, S.J.; Woo, R.Y.; Jung, H.K.. Development of MFL System for In-Pipe Robot for Unpiggable Natural Gas Pipelines. In Proceedings of the 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Jeju, Korea, May 30, 2013; IEEE: New York, NY, USA, 2013; pp. 51-54.
8. ULTRASONIC METAL LOSS INSPECTION (UT). Pipecare: [site]. URL: <https://www.pipecaregroup.com/ultrasonic-inspection/> (accessed 14.10.2022). Text: electronic.
9. Combined magnetic-ultrasonic flaw detectors (MFL+WM+CD). Diaskan-Transneft: [site]. URL: https://diascan.transneft.ru/u/section_file/239869/07_kombinirovannie_magnitno-ultrazvykovie_defektoskopi_jpg (date of reference: 14.10.2022). - Text: electronic.
10. Johnson, K. L. Chapters 4-6, 8, 9 . Mechanics of contact interaction = Contact Mechanics / R.V. Goldstein. 1-e. Moscow: Mir, 1989. 510 с. ISBN 5-03-000994-9.
11. Zhang Y. In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting / Y. Zhang, G. Yan /. Mechanism and Machine Theory 42 (2007) 1618-1631.
12. Calculator online - Find (with solution) the derivative of a function (math-solution.ru).
13. Anuriev V.I. Reference book of the designer-machine builder / Anuriev V.I. Volume 2, p. 773. Moscow "MACHINOSTROENIE" 2006.
14. 17HS4401: Characteristics and review of the stepper motor Nema 17 | Wiki (gistroy.ru)
15. Nema17 4-wire stepper motor, 42 Nema 17 motor, 1.5A 38mm motor (17HS4401) for 3D printer and CNC XYZ - buy at a bargain price | AliExpress

RESUME

O. A. Butov

Investigation of the mechanism of adaptation of an in-tube robot to the diameter of the pipe and adjustment of traction force when using omnidirectional wheels

Background, initial data: for in-tube wheeled robots operating "in stride", there has always been a problem of overcoming the transverse coupling of the tires of the support wheels with the walls of the pipe. This led to the use of a high-torque control motor in robots and, as a result, to the weighting of their design. Therefore, there is a need to replace conventional wheels with omnidirectional ones as support wheels.

Materials and methods: the article uses methods of theoretical analysis and mathematical calculations based on equations of theoretical mechanics.

Results: when applying the above methodology, the parameters of the mechanism of adaptation of such robots to the diameter of the pipe, its physical design and 3D model are determined. This makes it possible to use them to develop algorithms that can automatically control certain required robot behavior.

Conclusion: the proposed method is applicable to pipelines of various diameters and makes it possible to simplify calculations when creating similar robots.

РЕЗЮМЕ

О. А. Бутов

Исследование механизма адаптации внутритрубного робота к диаметру трубы и регулировки тягового усилия при применении всенаправленных колес

История вопроса, исходные данные: для внутритрубных колесных роботов, работающих «в распор», всегда существовала проблема преодоления поперечного сцепления шин опорных колес со стенками трубы. Что приводило к использованию в роботах регулирующего двигателя с высоким крутящим моментом и в итоге к утяжелению их конструкции. Поэтому существует необходимость замены обычных колес на всенаправленные в качестве опорных.

Материалы и методы: в статье использованы методы теоретического анализа и математических расчетов на основе уравнений теоретической механики.

Результаты: при применении приведенной методики определены параметры механизма адаптации таких роботов к диаметру трубы, его физическая конструкция и 3D-модель. Что дает возможность использовать их для разработки алгоритмов, которые могут автоматически контролировать определенное требуемое поведение робота.

Заключение: предложенный метод применим к трубопроводам различного диаметра и дает возможность упростить расчеты при создании аналогичных роботов.

Бутов Олег Анатольевич - ФГБУ ИПИИ, м.н.с./инженер-исследователь, 283048, г. Донецк, ул. Артема, дом 118 б, +7 (856) 311-34-24, gu_ipii@mail.ru; boa.ipai@mail.ru

Область научных интересов: теория механизмов, робототехника, технология компьютерного зрения с использованием системы искусственного интеллекта.

Статья поступила в редакцию 04.02.2024.