

УДК 621.643.865

ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ТРУБОПРОВОДОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Егоров И.Н.¹, Кадхим Д.А.*

Владимирский государственный университет, г. Владимир

¹ e-mail: egorovmf@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены способы перемещения мобильных роботов в трубопроводах и отмечены технологические трудности внутритрубной диагностики распределительных газопроводов и газопроводов-отводов с переменным поперечным сечением. Показана возможность диагностики подобных газопроводов самодвижущимися адаптивными колесными мобильными роботами. Описаны механизмы адаптации поджатия колесных модулей к внутренней поверхности трубопровода. Приведены основные расчетные соотношения, алгоритмы вычислений и функциональная схема системы позиционно-силового управления механизмом поджатия колесных модулей.

Ключевые слова: *трубопровод, мобильный робот, адаптация, механизм адаптации, дефекты, поперечное сечение, колесные модули, управление*

Важнейшей составной частью энергетического комплекса являются нефтегазотрубопроводные системы. Из общего числа отказов трубопроводов, наибольшее число отказов приходится на долю брака строительно-монтажных работ (примерно 27 %), механических повреждений (примерно 23 %, в т.ч. из-за дефектов формы поперечного сечения типа овализации и образований вмятин, гофр и других дефектов), заводского брака труб (примерно 22 %) и коррозионных повреждений (примерно 28 %).

Одним из необходимых условий обеспечения эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов (МТ) является диагностирование их с помощью комплекса внутритрубных инспекционных снарядов (ВИС): снарядов-профилемеров и снарядов-дефектоскопов [1]. Подобные устройства относятся к подвижным мобильным роботам (МБР), перемещающимся в потоке транспортируемого продукта под действием избыточного давления создаваемого жидкостью или газом внутри трубопровода [2].

К подвижным МБР движущихся внутри трубопроводов с помощью «механических» движителей относятся роботы колесного, гусеничного, стено-нажимного, шагающего, ползущего и винтообразного типа.

В качестве примера робота *колесного типа* можно привести робот-дефектоскоп типа «Авгур 5.2» автомобильной конструкции, применяемый ООО «НПЦ

* Аспирант, республика Ирак

ЭХО+» при комплексной технологии ультразвукового контроля трубопроводов газоперекачивающих компрессорных станций [3].

Применение в Авгур 5.2 вместо линейных манипуляторов двухступенных манипуляторов (рис. 1) позволяет размещать УЗ преобразователи в любой точке верхней полуплоскости внутренней поверхности трубопровода.

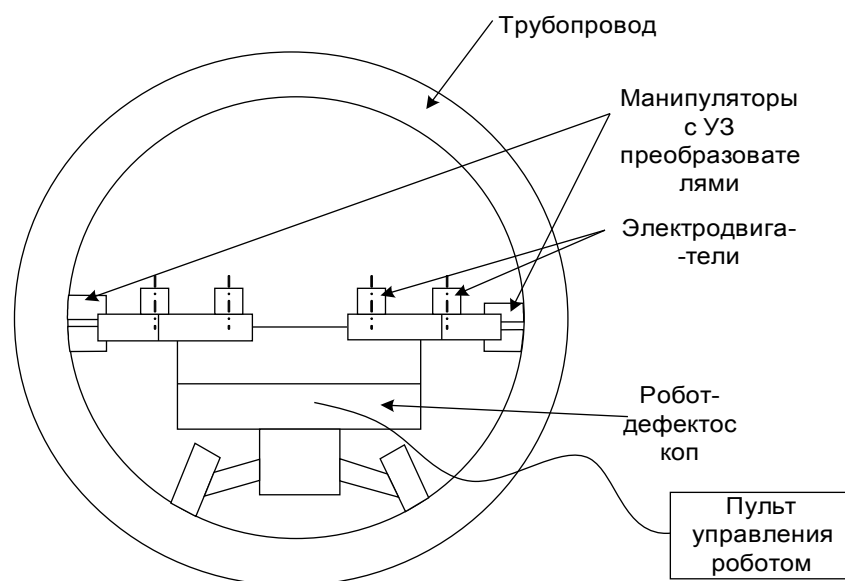


Рис. 1. Робототехническая система интегрального ультразвукового контроля подземных трубопроводов

Другим примером колесного МБР являются самодвижущиеся тележки кроулеров, применяемых компаниями «ARGUS LIMITED» и «JME» в автоматизированных системах рентгеновского контроля сварных стыков для обеспечения доставки и позиционирования источника излучения точно по центру трубы с диапазоном диаметров от 135 до 1800 мм.

Колесные мобильные роботы автомобильной конструкции специального применения активно разрабатываются в ОКБ специальной робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ «Станкин», КЭМЗ, НПО «Гарис» и зарубежных организациях [4-6].

По ряду причин возможность выявления дефектов труб на некоторых участках линейной части МГ остается проблематичной. К таким участкам относятся неравнопроходные подводные переходы через водные преграды, резервные нитки подводных переходов газопроводов, участки с наличием подкладных колец. Ввиду неэффективности пропуска ультразвуковых приборов-дефектоскопов в перемещаемой водной пробке или использование водного потока, создаваемого мощным насосом, в качестве движителя прибора-дефектоскопа предложено при-

менить технологию внутритрубной дефектоскопии МГ с использованием самодвигающегося ультразвукового дефектоскопа [7, 8]. Дефектоскоп, управляемый по оптико-волоконному кабелю находится на *транспортном средстве, самодвижущемся* в заполненном водой трубопроводе длиной до 7,5-20 тыс. м.

Протяжённость трубопроводов газораспределительных сетей, в т.ч. региональных газопроводов и газопроводов-отводов среднего и высокого давления (до 0,6 МПа) в России сегодня превышает 840 тыс. км, что почти в 4 раза превышает протяжённость магистральных газо-, нефте- и нефтепродукто-трубопроводов вместе взятых.

В отличие от магистральных газопроводов, диагностика газоотводов низкого и среднего давления вызывает серьёзные технологические трудности. Наиболее сложными объектами региональных распределительных газопроводов являются [3]: крановые узлы, подводные переходы газопроводов, переходы газопроводов через автомобильные и железные дороги, технологические перемычки между газопроводами и пересечений газопроводов. Движение диагностического снаряда (магнискана) в газоотводе происходит с многочисленными остановками на сужениях или даже кольцевых сварных швах. В снарядах-поршнях традиционной конструкции реализация плавного продвижения через сужения трубопровода невозможна, что приводит к потере диагностических данных на многих участках газопровода.

В последнее время для решения проблемы неравномерности движения в газопроводах предлагается использовать (и уже используются при диагностике магистральных газопроводов) снаряды с управляемым байпасным отверстием. Регулирование перетеканием газа в случае, если накопленное за снарядом давление заставляет его двигаться с недопустимой для успешной диагностики скоростью, осуществляется с помощью канала с регулируемой электроникой заслонками. Другим способом уменьшения перепада давления, требуемого для прохождения сужения, является применение на снаряде подвижных манжет. В ООО «АПРОДИТ» изготовлен действующий прототип снаряда с активными манжетами для трубопровода диаметром 150 мм.

Во Владимирском государственном университете им. А.Г. и Н.Г. Столетовых предложено с целью повышения эффективности операций внутритрубной диагностики распределительных газопроводов и газопроводов-отводов низкого, среднего и высокого давления применять самодвижущиеся диагностические устройства, перемещаемые с помощью колесных мобильных роботов.

Для прохождения отводов, наклонных и особенно вертикальных участков трубопровода целесообразно применение колесных МБР с 3-х контактной лучеобразной кинематикой (рис. 2) секций системы передвижения, в которой три отдельных ведущих движителя типа мотор-колесо с дифференциальным управлением их скоростью расположены друг относительно друг под углом 120°.

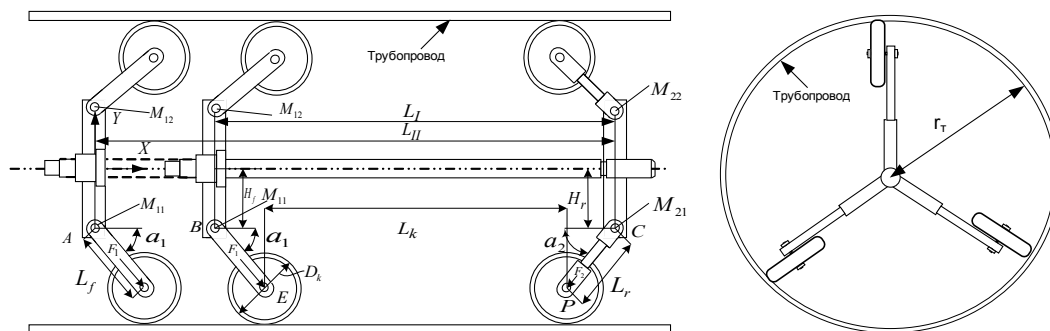


Рис. 2. Кинематическая схема адаптивного МБР с 3-х контактной лучеобразной системой передвижения

Здесь приняты следующие обозначения: r_T – радиус трубопровода; H_f , H_r – расстояние между центральной осью робота и шарнирами B , C ; L_r , L_f – длины линейных звеньев колесных модулей (КМ); L_I , L_{II} – длины базы крепления лучеобразных секций системы передвижения; L_k – настраиваемое расстояние между центрами КМ; α_1 , α_2 – углы наклона линейных звеньев КМ; F_{1i} , F_{2i} ($i = 1, 2, 3$) – силы в линейных звеньях, создаваемые линейными приводами; M_{1i} , M_{2i} ($i = 1, 2, 3$) – моменты, создаваемые электродвигателями; D_k – диаметр колес.

Мобильные роботы для внутритрубопроводной диагностики в общем случае представляют собой интеллектуальные многомерные устройства, построенные на мехатронных принципах и технологиях, которые способны эффективно выполнять программы функциональных движений в изменяющихся условиях трубопроводных систем. Обобщенная структура колесных мобильных роботов состоит из четырех основных частей (рис. 3): механическое устройство (двигатель), конечным звеном которого является рабочий орган – колесный модуль; блок электроприводов, включающий в себя силовые преобразователи и исполнительные двигатели; устройство компьютерного управления, на вход которого поступают команды человека-оператора, либо ЭВМ верхнего уровня управления; информационное устройство с датчиками проскальзывания, предназначенное для получения и передачи в устройство компьютерного управления данных о реальном движении МБР и о фактическом состоянии его подсистем.

Для исключения проскальзывания необходимо увеличивать силу давления ведущих КМ на поверхность трубопровода с помощью механизмов пассивной или активной адаптации поджатия движителей. В качестве примера механизмов пассивной адаптации поджатия КМ (МАПКМ) МБР заслуживают внимания, разработанные в Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca механизмы типа приведенных на рис. 4.

Активная адаптация положения КМ при изменении диаметра поперечного сечения трубопровода может осуществляться, например за счет управляемого уг-

лового или линейного перемещения КМ с помощью двигателей M_{1i}, M_{2i} ($i = 1, 2, 3$) приводов вращательного или линейного типа (рис. 2).

Изменяя длину базы крепления L_I, L_{II} (рис. 2) можно настраивать диапазон углов наклона α_1 и α_2 КМ при изменении диаметра трубопровода.



Рис. 3. Обобщенная структура колесных мобильных роботов

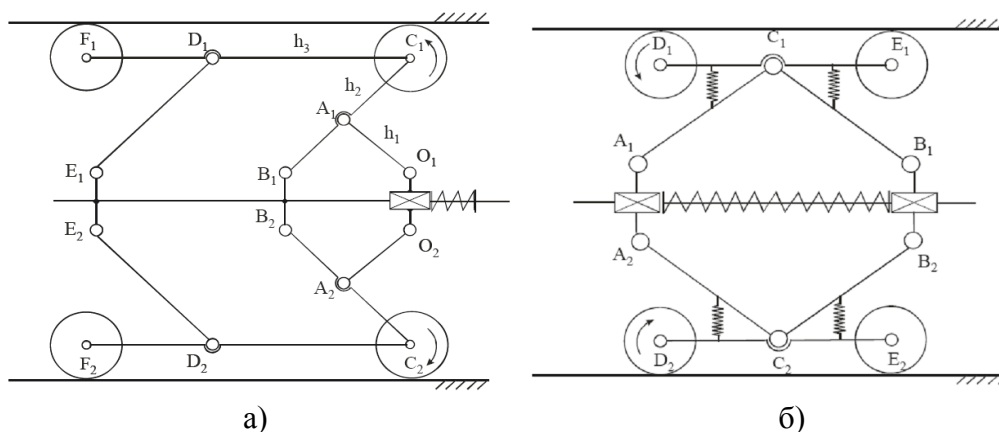


Рис. 4. Кинематические схемы механизмов пассивной адаптации поджатия колесных модулей:

- а) одноредукторный механизм;
- б) двухредукторный механизм

Если нормальная сила равна $N = F_T / 3\mu$, то силы в каждой опоре и настроечные параметры МАПКМ при весе робота G определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} F_{1i}(N_i) = \frac{N_i \cos \alpha_2 + (\mu N_i - G) \sin \alpha_2}{4 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ F_{2i}(N_i) = \frac{N_i \cos \alpha_1 - (\mu N_i - G) \sin \alpha_1}{2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (i=1,2,3); \quad (1)$$

$$L = L_r \cos \alpha_2 + L_f \cos \alpha_1 + L_k; \quad (2)$$

$$\alpha_1(r_m) = \text{Arcsin} \left(\frac{\left[r_m - \left(H_f + \frac{D_k}{2} \right) \right]}{L_f} \right); \quad (3)$$

$$\alpha_2(r_m) = \text{Arcsin} \left(\frac{\left[r_m - \left(H_r + \frac{D_k}{2} \right) \right]}{L_r} \right). \quad (4)$$

Увеличение количества секций системы передвижения до трех и применение механизмов комбинированной (пассивно-активной) адаптации (рис. 5), позволяет проходить не только прямолинейные участки, но также отводы, тройники и разветвители трубопроводов, в т.ч. при наличии препятствий и вертикальном расположении трубопровода.

Комбинированная адаптация к изменению диаметра трубопровода обеспечивается применением активного механизма на базе мехатронного модуля линейного перемещения состоящего из роликовинтовой передачи (РВП), вентильных двигателей фирмы Махон, подвижного звена 4 и упругого кинематического звена в виде пружины, связанной с корпусом 5.

Величина перемещения пружины механизма адаптации равна:

$$x = L_1 \cos \alpha + L_2 \cos \beta. \quad (5)$$

Уравнение равновесия сил и реакций связей без учета (N_1, N_2, N_3) может быть записано в следующем виде:

$$\begin{cases} F_x L_2 \sin \alpha = \sum N_p (L - L_1) \cos \beta; \\ F_y = 0, \end{cases} \quad (6)$$

Откуда, получаем:

$$\sum N_p = F_x \left[\frac{x - (L_1 \cos \beta)}{(L - L_1)} \right] \frac{\text{tg } \alpha}{\cos \beta} = F_x \left(\frac{L_2}{L_1 - L_2} \right) \frac{\cos \beta}{\sin \alpha}. \quad (7)$$

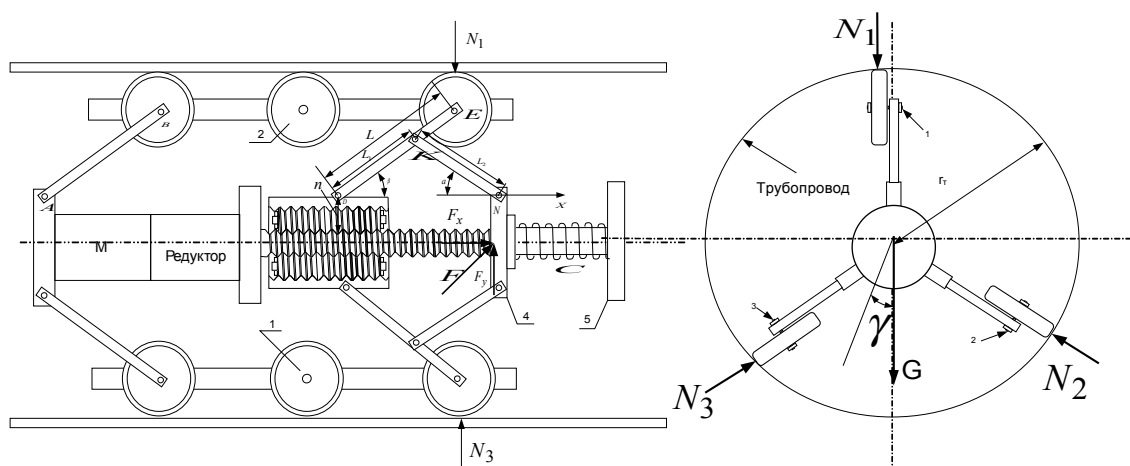


Рис. 5. Кинематическая схема МБР с 3-х секционной системой передвижения и механизмом комбинированной адаптации поджатия КМ:

РВП – роликвинтовая передача; 1, 2 – электродвигатели с самотормозящимися червячными передачами, обеспечивающие вращение всех КМ робота; L, L_1, L_2 – длины звеньев ED, DK, KN; α, β – углы между звеньями ED, KN и осью X; γ – угловая ориентация робота; ψ – угол наклона трубопровода; N_p – сила поджатия КМ к поверхности трубопровода; N_1, N_2 и N_3 – реакция поверхности трубопровода на два ведущих колеса из-за веса робота; F_x и F_y – проекции силы F , действующей на звено 4; C, x – коэффициент жесткости и перемещение пружины

С учетом (N_1, N_2, N_3)

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

находим тяговую силу колеса мобильного робота

$$F_T = \left(\sum N + \sum N_p \right) \mu; \quad (9)$$

$$F_x = \left(\frac{F_T}{\mu} - \sum N \right) \left(\frac{L_1 - L_2}{L_2} \right) \frac{\sin \alpha}{\cos \beta}, \quad (10)$$

где

$$\sum N = \begin{cases} 2G \cos \psi \cos \gamma & \text{при } -60^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ; \\ 2G \cos(\gamma - 120^\circ) \cos \psi & \text{при } 60^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ; \\ 2G \cos(\gamma - 240^\circ) \cos \psi & \text{при } 180^\circ \leq \gamma \leq 300^\circ. \end{cases} \quad (11)$$

Регулируя величину осевой силы F_{oc} можно перемещением параллелограмма ABED изменять радиальный размер r_p робота. Упрощенная функциональная схема предлагаемой системы управления с адаптацией системы передвижения МБР к изменению поперечного сечения трубопровода показана на рис. 6 [2]. На первом этапе, до прижатия КМ к поверхности трубопровода, система работает в режиме позиционного управления. После контакта КМ с препятствием или поверхностью трубопровода система переводится в режим силового управления.

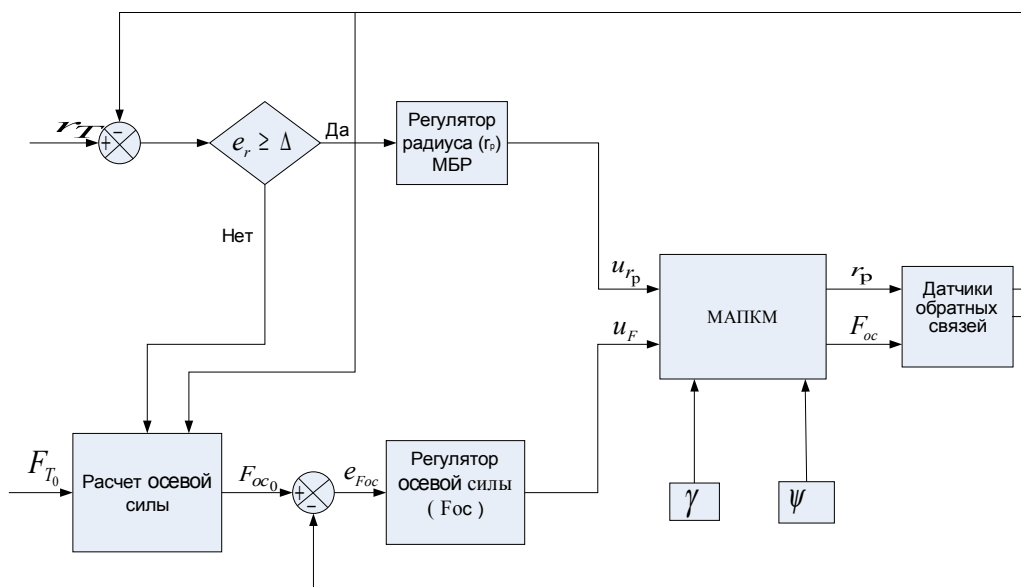


Рис. 6. Функциональная схема системы позиционно-силового управления МАПКМ: r_m , F_{T_0} , γ , ψ – задания диаметра трубопровода, тяговой силы, углов расположения лучеобразных секций системы передвижения и наклона трубопровода.

Блок-схема алгоритма вычисления величин действующих сил и реакций связей микропроцессорным устройством мобильного робота в соответствии с приведенными выражениями, представлена на рис. 7.

Анализ состояния поверхности трубопровода и измерение пройденного пути осуществляется мехатронными анализаторами (рис. 8).

Чувствительность мехатронного анализатора определяется первичными преобразователями, которые устанавливаются на трех отдельных звеньях-подпружиненных рычагах, расположенных друг относительно друга под углом 120° . Одна из проблем диагностики состояния поверхности магистральных и распределительных трубопроводов заключается в нахождении круглых дефектов типа показанных на рис. 9 и определении координат их местоположения [9].

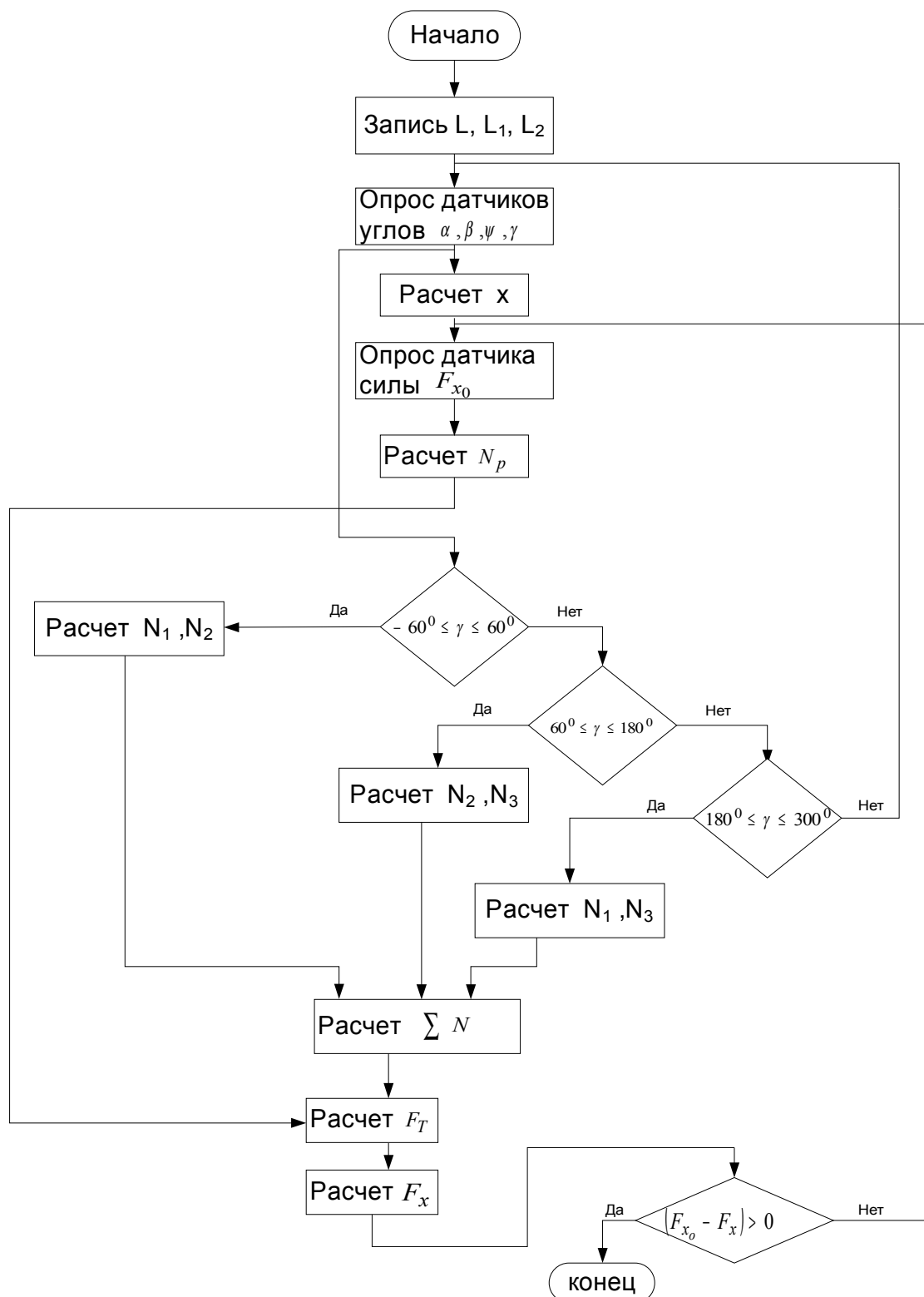


Рис. 7. Блок-схема алгоритма вычисления величин действующих сил и реакций связей

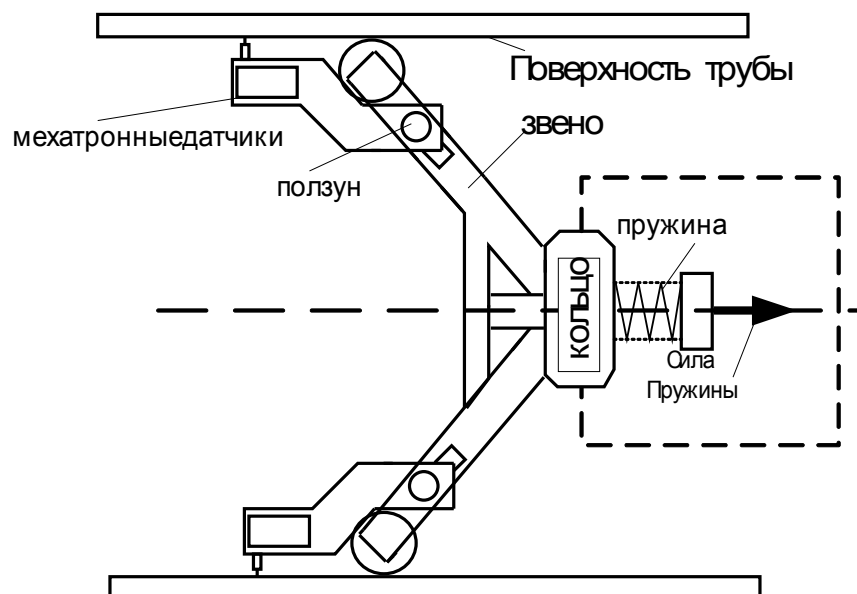


Рис. 8. Мехатронный анализатор дефектов геометрии трубопровода



а)

б)

Рисунок 9. Несплошности в виде:

- а) круглого отверстия диаметром 10 мм;
- б) плавного изменения толщины круглой формы диаметром 70 мм и остаточной глубины 6 мм в трубопроводе ДУ 1000

Как уже отмечалось, диагностика подобных дефектов в распределительных газопроводах с помощью магнисканов практически невозможна вследствие неравномерности передвижения снарядов. При ультразвуковой диагностике число УЗ датчиков, например для прибора 28" (труба диаметром 720 мм), может достигать 480 датчиков. На вход УЗ датчика приходит очень сложный отраженный сигнал, из которого необходимо извлечь полезную информацию о наличии дефектов их параметрах. Вследствие использования большого числа датчиков и сложных алгоритмов обработки информации резко возрастают объем электроники, потребляемая мощность и, как следствие, число секций и длина внутритрубного дефектоскопа.

Поэтому, при решении подобных задач целесообразно применять интеллектуальные автономные МБР [2, 11, 12], оснащенных системами видеодиагно-

стики и телеинспекции трубопроводов. Применение многофункциональной системы технического зрения позволяет идентифицировать местонахождение, форму и размеры круглых дефектов с помощью визуальных алгоритмов и системы нечеткого управления [10, 11].

Литература

1. РД 51-2-97. Инструкция по внутритрубной инспекции трубопроводных систем. РАО «Газпром». 27 с.
2. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2010. 192 с.
URL: <http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/2382>
3. Митрохин М. Ю., Спирин В. А., Александров В.А. Внутритрубная диагностика труднодоступных участков линейной части МГ // Газовая промышленность. 2008. №6. С. 72-74.
4. Komori M., Suyama K. Inspection robots for gas pipelines of Tokyo Gas // Proceedings of the conference Advanced Robotics, 2001, Vol. 15, № 3, pp. 365-370.
5. Suzumori K., Wakimoto S., Takata M. A Miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, 2003, pp. 2735-2740.
6. Moghadam M., Hadi A. Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC) // Proceedings of 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005- September 11-14, 2005, Ferrara (Italy).
7. Тихонов Д.С. Основные этапы автоматизированного УЗК с определением размеров дефектов системами серии «АВГУР» // В мире неразрушающего контроля, 2006, № 3 (33). С. 24-28.
8. Предущенко А.В., Осипова О.И. Диагностика распределительных газопроводов // Газовая промышленность. 2008. № 6. С. 82-83.
9. Комплексная технология ультразвукового контроля трубопроводов газоперекачивающих компрессорных станций. М.: «НПЦ ЭХО+». 29 с.
10. Егоров И.Н., Кадхим Д.А. Управление технологическим оборудованием в условиях нестационарности параметров изображения и положения подвижного объекта // Проектирование и технология электронных средств. 2009. № 3. С. 65-70.
11. Егоров И.Н., Матлуб М.М. Управление роботами на основе позиционно-силовых и нечетких визуальных алгоритмов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 1. С. 158-165.
12. Егоров И.Н., Кадхим Д.А. Нечеткое позиционно-силовое управление перемещением мобильного робота в трубопроводах с нестационарными геометрическими параметрами // Труды Девятого междунар. симпозиума «Интеллектуальные Системы» (INTELS' 2010) / Под ред. К.А. Пупкова. М.: РУСАКИ, 2010. С. 554.

APPLICATIONS MOBILE ROBOTS FOR DIAGNOSTIC INSIDE PIPELINES WITH VARIABLE CROSS-SECTION

I.N. Egorov¹, D.A. Kadhim

Vladimir State University, Vladimir, Russia

¹ *e-mail: egorovmtf@mail.ru*

Abstract. *The ways of moving of the mobile robots in the pipelines are considered and the technological difficulties of inside pipe diagnostics of distributive gas pipelines and the gas pipelines - branch's with variable cross section are marked. The possibility of diagnostics of such as gas pipelines self-moving by adaptive wheel mobile robots is shown. The mechanisms of adaptation pressing of wheel modules to an internal surface of the pipeline are described. The basic computational relations, algorithms of computation and function scheme of the system position-force control of the mechanism pressing of wheel modules are given.*

Keywords: *pipeline, mobile robot, adaptation, mechanism of adaptation, defects, cross section, wheel modules, control*

References

1. RD 51-2-97. Instruktsiya po vnutritrubnoi inspektsii truboprovodnykh sistem (Instructions for in-line inspection of pipeline systems). Gazprom, 1997. 27 p.
2. Egorov I.N. Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami (Position and force control of robotic and mechatronic devices). Vladimir: Publishing House of Vladimir State University, 2010. 192 p.
<http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/2382>
3. Mitrokhin M. Yu., Spirin V. A., Aleksandrov V.A. Vnutritrubnaya diagnostika trudnodostupnykh uchastkov lineinoi chasti MG (In-line inspection of the hard-to-reach areas of the linear main gas pipeline). *Gazovaya promyshlennost*, 2008, Issue 6, pp. 72-74.
4. Komori M., Suyama K. Inspection robots for gas pipelines of Tokyo Gas. *Proceedings of the conference Advanced Robotics*, 2001, Vol. 15, № 3, pp. 365-370.
5. Suzumori K., Wakimoto S., Takata M. A Miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Taipei, Taiwan, 2003, pp. 2735-2740.
6. Moghadam M., Hadi A. Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC). *Proceedings of 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005*, September 11-14, 2005, Ferrara (Italy).
7. Tikhonov D.S. Osnovnye etapy avtomatizirovannogo UZK s opredeleniem razmerov defektov sistemami serii "AVGUR" (The main stages of automated ultrasonic testing with the determination of defect sizes by systems "Augur"). *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2006, Issue 3 (33), pp. 24-28.

8. Predushchenko A.V., Osipova O.I. Diagnostika raspredelitel'nykh gazoprovodov (Diagnostics of gas distribution pipelines). *Gazovaya promyshlennost*, 2008, Issue 6, pp. 82-83.

9. Kompleksnaya tekhnologiya ul'trazvukovogo kontrolya truboprovodov gazoperekachivayushchikh kompressornykh stantsii (Complex technology of ultrasonic testing of pipeline gas-compressor stations). Moscow: "NPC ECHO+". 29 p.

10. Egorov I.N., Kadkhim D.A. Upravlenie tekhnologicheskim oborudovaniem v usloviyakh nestatsionarnosti parametrov izobrazheniya i polozheniya i podvizhnogo ob"ekta (Control of technological equipment under conditions non-stationary image parameters and position of a moving object). *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, 2009, Issue 3, pp. 65-70.

11. Egorov I.N., Matlub M.M. Upravlenie robotami na osnove pozitsionno-silovykh i nechetkikh vizual'nykh algoritmov (Control of assembling robots based on position-force algorithms in conditions of uncertainties and fuzzy visual tracking of object). *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, Issue 1. pp. 158-165.

12. Egorov I.N., Kadkhim D.A. Nechetkoe pozitsionno-silovoe upravlenie peremeshcheniem mobil'nogo robota v truboprovodakh s nestatsionarnymi geometricheskimi parametrami (Fuzzy position-force control of a mobile robot moving in pipelines with non-stationary geometrical parameters) in *Trudy IX mezhdunar. simpoziuma "Intellektual'nye Sistemy"* (Proceedings of IX Int. Symposium "Intelligent Systems") *INTELS' 2010*. Moscow: RUSAKI, 2010. p. 554.