

УДК 62-503.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛОСКОГО ШЕСТИЗВЕННОГО ВНУТРИТРУБНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

© 2012 А.В. Мальчиков, С.Ф. Яцун, С.Б. Рублев

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Поступила в редакцию 28.11.2012

В статье рассмотрена конструкция плоского шестизвенового мобильного робота предназначенного для мониторинга внутренней поверхности трубопроводов. Предложена математическая модель движения и представлены результаты численного моделирования движения конструкции под действием крутящих моментов, создаваемых приводами средней пары звеньев робота.

Ключевые слова: *шестизвеновый мобильный робот, мониторинг, трубопровод, математическая модель*

Трубопроводы на сегодняшний день являются основными элементами систем транспортировки газообразных и жидких веществ, а также твердых веществ в виде раствора на большие расстояния. Так как подобные системы, как правило, устанавливаются под землей или внутри зданий, то существует проблема ограниченности доступа к трубам при выполнении работ по проверке состояния и поддержании их эксплуатационных свойств. Крайне актуальной задачей является разработка и изучение способов, позволяющих осуществлять мониторинг состояния внутренней поверхности трубопровода, поиск микротрещин, разрывов и т. д., не требуя при этом доступа к трубе на всей протяженности. На сегодняшний день разработан ряд различных подходов к перемещению внутри трубопроводов. Главным недостатком традиционных колесных и гусеничных систем является низкая проходимость в условиях загрязненности трубы [1, 2]. Наиболее перспективными являются многозвеновые конструкции, копирующие змее- и червеподобные походки [3, 4], способные перемещаться в условиях загрязненности трубопровода, а также смены диаметра и поворотов.

В основе перемещения рассматриваемой в данной работе конструкции лежит принцип поочередной фиксации передней и задней пары звеньев (фиксирующих модулей) и перемещения центра масс робота при движении средней пары звеньев. Процесс фиксации внутри трубопровода подробно описан в работах [5, 6]. В данной же работе рассматривается движение средней пары звеньев робота внутри трубопровода.

Описание схемы робота. Рассмотрим конструкцию робота внутри трубопровода (рис. 1). Звенья 1 и 2 осуществляют фиксацию робота внутри трубопровода за счет сил трения. Точку A_3 считаем неподвижной. Введем неподвижную систему координат с центром в точке A_3 , и повернутую на угол ζ относительно линии горизонта. Звенья 3 и 4

осуществляют перемещение переднего фиксирующего модуля (звенья 5 и 6) под действием крутящих моментов M_{23} и M_{34} . При этом звенья 5 и 6 совершают движения между собой и поэтому рассматриваются в нашем случае как сосредоточенная масса, приложенная в точке A_5 . Примем, что центры масс звеньев A_3A_4 и A_4A_5 расположены в их геометрических центрах O_3 , O_4 . Введем подвижные системы координат $X_3Y_3O_3$ и $X_4Y_4O_4$ связанные с центрами масс звеньев. В точке A_5 действует приведенная сила F_5 и приведенный момент M_5 , которые определяются путем приведения сил веса звеньев, а также сил инерции действующих на звенья 4 и 5.

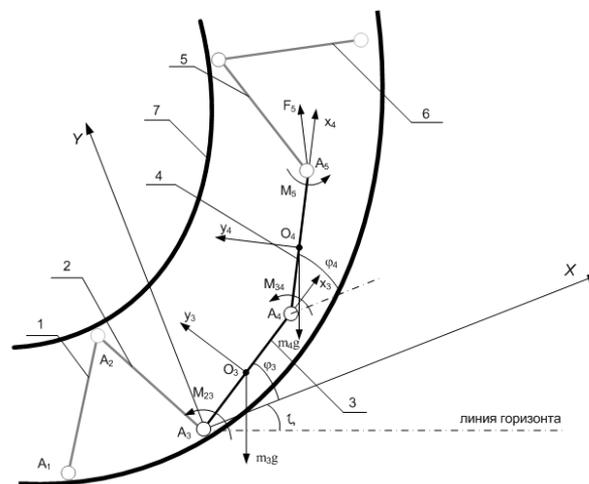


Рис. 1. Расчетная схема мобильного робота

Математическая модель движения робота. Для расчета кинематических параметров движения средних звеньев, в качестве обобщенных координат примем углы поворота обоих звеньев относительно их центров масс φ_3 , φ_4 и запишем систему дифференциальных уравнений, основываясь на уравнениях Лагранжа 2-го рода. При этом правые части уравнений получим методом возможных перемещений. После преобразований итоговая система дифференциальных уравнений описывающих движение третьего и четвертого звена робота примет вид:

Мальчиков Андрей Васильевич, аспирант. E-mail: zveroknpr@gmail.ru

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики и мехатроники. E-mail: teormeh@inbox.ru

Рублев Сергей Борисович, аспирант

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_4 \left(J_{A_4} + \frac{m_4 l_4^2}{4} \right) + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_4) - \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_4) = \\ = M_{34} - M_5 + F_5 l_4 \sin(\alpha_5 - \varphi_4) + m_4 g \frac{l_4}{2} \cos(\zeta + \varphi_4) \\ \ddot{\varphi}_3 \left(J_{A_3} + m_4 l_3^2 \right) + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_3 - \varphi_4) + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_4) = \\ = M_{23} + F_5 l_4 \sin(\alpha_5 - \varphi_3) + m_4 g l_4 \cos(\zeta + \varphi_3) + m_3 g \frac{l_3}{2} \cos(\zeta + \varphi_3) \end{cases} \quad (1)$$

Рассмотрим крутящие моменты между звеньями робота M_{23} и M_{34} . В общем случае крутящий

$$M_i^{тр} = \begin{cases} M_i^{тр.пред} \text{sign}(\dot{\varphi}_i), & \text{если } \dot{\varphi}_i \neq 0; \\ \sum M_i^{внеш}, & \text{если } \dot{\varphi}_i = 0 \text{ и } \left| \sum M_i^{внеш} \right| \leq M_i^{тр.пред}, \\ M_i^{тр.пред} \text{sign}(\sum M_i^{внеш}), & \text{если } \dot{\varphi}_i = 0 \text{ и } \left| \sum M_i^{внеш} \right| > M_i^{тр.пред}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\sum M_i^{внеш}$ – равнодействующая всех внешних моментов для i -того шарнира, кроме моментов сил сухого трения; $M_i^{тр.пред}$ – предельное значение силы трения, определяемая действующими силами в шарнире и коэффициентом силы трения, в данном

момента между звеньями можно описать следующим уравнением: $M_i = M_i^{об} - M_i^{сопр}$, где i – номер шарнира, $M_i^{об}$ – момент развиваемый электроприводом i -того шарнира, а $M_i^{сопр}$ – момент сопротивления движению звеньев. Представим момент сопротивления как: $M_i^{сопр} = \mu \cdot \dot{\varphi}_i + M_i^{тр}$, где μ – коэффициент вязкого сопротивления, $M_i^{тр}$ – суммарный момент силы трения. Опишем момент силы трения, согласно закону Кулона:

случае, может быть определена экспериментально, для конкретно взятого привода; $\dot{\varphi}_i$ – скорость вращения звеньев для i -того шарнира.

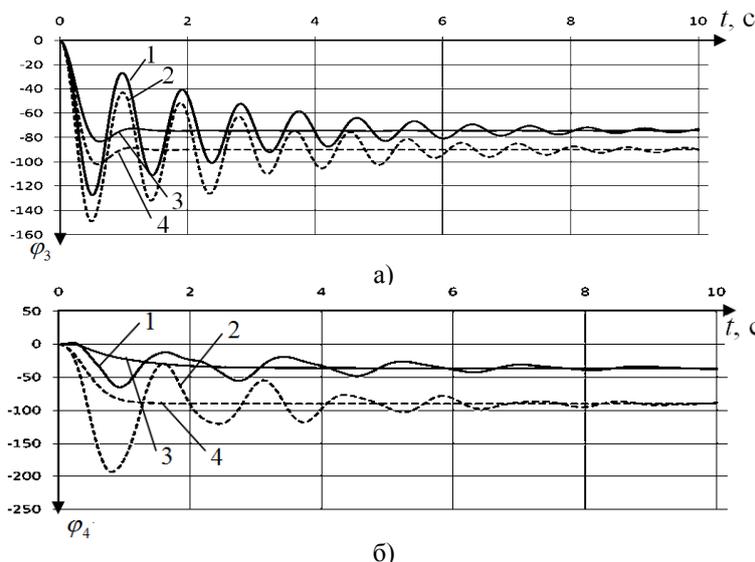


Рис. 2. Графики угла поворота звеньев под действие силы тяжести:

а) для третьего звена, б) для четвертого звена. 1 – угловое перемещение звена при коэффициенте силы вязкого сопротивления равном 0,001 и наличии момента силы трения в шарнире; 2 – перемещение при коэффициенте силы вязкого сопротивления равном 0,001, без силы трения; 3 – перемещение при коэффициенте силы вязкого сопротивления 0,01 и наличии момента сил трения в шарнире; 4 – перемещение при коэффициенте силы вязкого сопротивления = 0,01, без учета трения

Результаты численного моделирования.

Наличие сил сухого трения в модели приводит к разрывному характеру правых частей системы уравнений, в том числе появляется режим останова звеньев, поэтому вычислительный алгоритм расчета содержит специальные блоки операций, позволяющих смоделировать такие эффекты. Для определения характера движения звеньев под действием силы тяжести и моментов сопротивления в шарнире, были получены зависимости углового перемещения от времени при различных параметрах системы (рис. 2).

Покажем результаты моделирования движения звеньев под действием крутящих моментов электроприводов, задаваемых как: $M_{об} = k_{об} (\varphi_i^3 -$

$\varphi_i^{факт})$, где $k_{об}$ – моментный коэффициент, φ_i^3 – задаваемый угол, $\varphi_i^{факт}$ – фактическое значение угла. Покажем результаты моделирования при задаваемом угле для обоих звеньев $\varphi_i^3 = 60^\circ$. Как видно из графиков, при малых значениях коэффициента усиления крутящий момент, развиваемый электроприводом, недостаточен для компенсации сил трения и сил тяжести. Однако увеличение коэффициента пропорциональности привода к повышению колебательности системы, а следовательно ухудшению переходной характеристики. Далее покажем траектории перемещения точек A_4 и A_5 , при движении звеньев под действием крутящих моментов электроприводов. Точками показаны положения A_4 и A_5 в установившемся режиме.

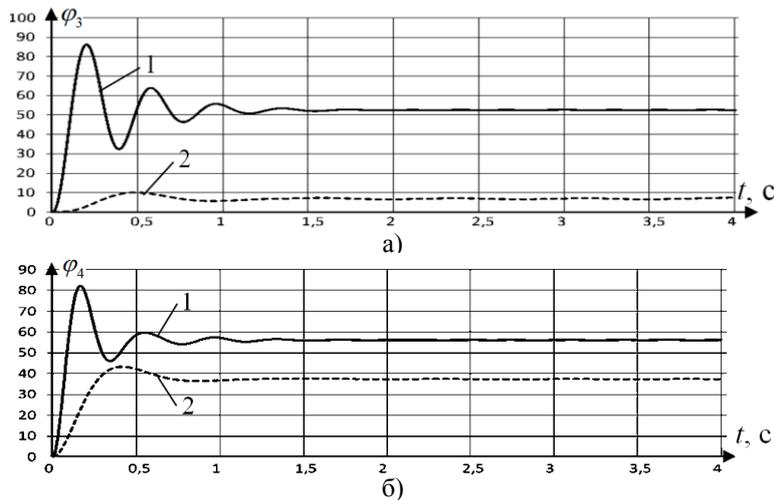


Рис. 3. Графики угла поворота звеньев под действие моментов развиваемыми приводами: а) третье звено, б) четвертое звено. 1 – коэффициент при системе управления $k_{об}=0,5$; 2 – коэффициент при системе управления $k_{об}=0,1$.

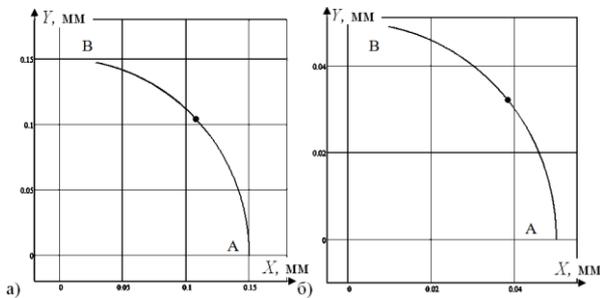


Рис. 4. Траектории движения точек A_4 (а) и A_5 (б) под действием крутящих моментов привода (движение происходит из точки А в точку В)

Выводы:

1. Составлена математическая модель движения плоского шестизвенного внутритрубного мобильного робота, позволяющая описать различные режимы движения устройства, отличающаяся тем, что в модели учитываются силы сухого трения в приводах, сила вязкого сопротивления, а также взаимодействие звеньев робота с внутренней поверхностью трубопровода.
2. Разработан алгоритм численного решения уравнений, позволяющий получить временные диаграммы и зависимости параметров определяющих характер движения звеньев робота.
3. Установлено, что наличие сухого и вязкого трения в шарнирных соединениях робота существенно влияет на характер движения звеньев робота. Так, увеличение коэффициента вязкого трения в 10 раз снижает колебательность системы в 4-5 раз. В то же время введение

силы сухого трения обуславливает появление статической ошибки.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг (Соглашение № 14.132.21.1718).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Maneewarn, T* Design of Pipe Crawling Gaits for a Snake Robot, proc / *T. Maneewarn, B. Maneechai* // IEEE Int. Conf. Robotics, Biomimetics, 2008. P. 1-6.
2. *Shin, H.C.* Development of a Snake Robot Moving in a Small Diameter Pipe / *H.C. Shin, K.M. Jeong, J.J. Kwon* // Int. Conf. Control, Automation, System. 2010. P. 1826-1829.
3. *Мальчиков, А.В.* Адаптивный мобильный робот для перемещения внутри трубопроводов / *А.В. Мальчиков, С.Ф. Яцун* // Современная мехатроника: сб. науч. трудов Всерос. науч. школы. – Орехово-Зуево, 2011. С. 121-125.
4. *Мальчиков, А.В.* Динамические опорные элементы ползающих роботов для движения по наклонным поверхностям / *А.В. Мальчиков, С.Ф. Яцун, А.И. Жакин* // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №2 (41). Ч.1. С. 89-95.
5. *Мальчиков, А.В.* Автоматизированный мобильный комплекс для диагностики трубопроводов переменного диаметра / *А.В. Мальчиков, С.Ф. Яцун* // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 3-8.
6. *Мальчиков, А.В.* Разработка математической модели опорного элемента ползающего робота, оснащенного бурильным модулем / *А.В. Мальчиков, С.Ф. Яцун* // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. научн. ст. – Курск, 2012. С.116-123.

RESEARCH THE MOVEMENT OF FLAT SIX-LINKS INTRAPIPE MOBILE ROBOT

© 2012 A.B. Malchikov, S.F. Yatsun, S.B. Rublyov
South-West State University, Kursk

In article the design of flat six-link mobile robot intended for monitoring the internal surface of pipelines is considered. The mathematical model of movement is offered, and results of numerical modeling of de-sign movement under the influence of the torques created by drives of middle couple of robot links are presented.
Key words: *six-links mobile robot, monitoring, pipeline, mathematical model*

Andrey Malchikov, Post-graduate Student. E-mail: zveroknnp@gmail.ru; Sergey Yatsun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics. E-mail: teormeh@inbox.ru; Sergey Rublyov, Post-graduate Student