

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОДКОПОЧНЫХ РАБОТ ЭКСКАВАТОРОМ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ СТЕНКИ ТРУБОПРОВОДА

При управлении движением ковша экскаватора оператор управляет поступательными перемещениями в гидроцилиндрах, которые в общем случае являются независимыми. Однако обеспечение движения режущей кромки ковша по заданной траектории (например, по горизонтальной прямой) требует от оператора определенных навыков и дополнительной концентрации внимания. Это значительно влияет на утомляемость оператора при проведении указанных работ. В этом случае актуальным становится решение проблемы разработки автоматизированной системы управления, позволяющей осуществлять расчет изменения углов поворота во вращательных шарнирах манипулятора экскаватора, обеспечивающих заданное движение ковша. Оператор при этом может указывать только начальные и целевые точки траектории и направление движения ковша. В статье на основе исследования геометрических объектов пространства приращений обобщенных координат разработан алгоритм, позволяющий выполнять моделирование движения точек ковша экскаватора с заданным удалением от верхней кромки ремонтируемого трубопровода. В качестве геометрических объектов исследованы положения плоскостей и их пересечения, которые заданы линейными системами уравнений, отражающими взаимосвязь приращений обобщенных координат механизма манипулятора от скоростей выходного звена ковша экскаватора. Исследованы положения указанных геометрических объектов для различных положений механизма манипулятора экскаватора и различных значений скоростей выходного звена. Приведены результаты компьютерного моделирования движения манипулятора экскаватора.

Ключевые слова: плоскости пространства приращений обобщенных координат, геометрическое моделирование, синтез движения, механизм манипулятора экскаватора, ремонт трубопроводов, компьютерное моделирование движений, выходное звено.

Введение. При ремонте трубопроводов основной машиной для освобождения трубопровода от грунта является экскаватор. Экскаватор позволяет осуществлять выемку грунта с обеих сторон от трубопровода, однако процесс удаления слоя грунта непосредственно над трубой требует соблюдения более строгих мер безопасности в связи с тем, что риск повреждения трубопровода при выполнении данной операции существенно выше, чем при откапывании боковых приямков траншеи [1–7]. В связи с вышеизложенным становится актуальным решение задачи разработки и использования автоматизированной системы управления работой гидроцилиндров с наличием блока, обеспечивающего активную безопасность. Это позволит исключить вероятность повреждения трубопровода ковшом экскаватора [8–13]. Устройство безопасности

предназначено для автоматического управления движением ковша экскаватора с постоянным контролем приближения ковша к стенке трубопровода. При разработке указанной автоматизированной системы управления существует необходимость в решении некоторых геометрических задач (например, вычисление значений обобщенных координат, углов ориентации ковша экскаватора и другое). Оценка наличия или отсутствия решений в используемых математических моделях может быть выполнена с помощью проведения соответствующего геометрического и компьютерного моделирования.

Постановка задачи исследования. Исходными данными задачи компьютерного управления движением механизма манипулятора экскаватора, позволяющего осуществлять перемещения ковша, являются следующие геометрические параметры (рис. 1.):

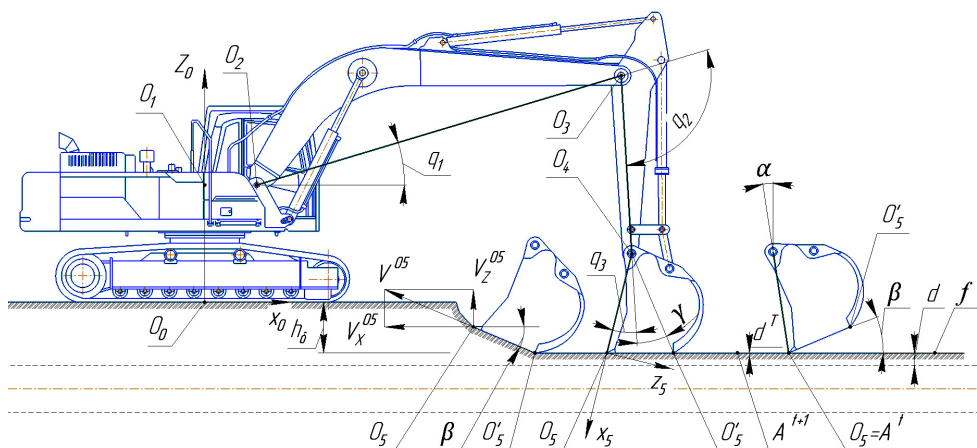


Рис. 1. Геометрические параметры положения ковша относительно трубопровода

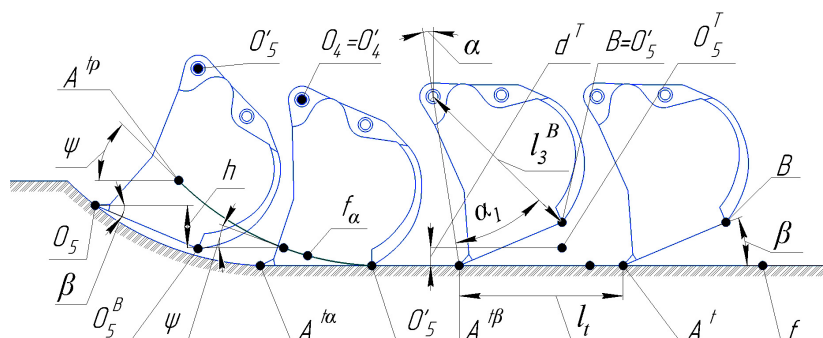


Рис. 2. Геометрическая схема движения ковша по участкам заданной траектории

1. Длины звеньев l_1, l_2, l_3 и начальные значения трех обобщенных координат q_1, q_2 и q_3 , определяющих вращение звеньев механизма в кинематических парах, оси вращения которых проходят через точки O_2, O_3 и O_4 . Так как вращение механизма экскаватора вокруг оси z_0 не учитывается при моделировании движения ковша, то будем считать заданный механизм плоским.

2. Заданные траектории f движения точек O_5 и B и углы β и α ориентации ковша экскаватора в неподвижной системе координат $O_0x_0z_0$.

3. Безопасное расстояние d от ковша до верхней кромки ремонтируемого трубопровода и заданное расстояние d^T , характеризующее отклонение точки центра выходного звена от заданной траектории f .
Выходными данными поставленной задачи являются вычисленные промежуточные значения обобщенных координат q_i , обеспечивающие движение ковша по заданным траекториям с заданными условиями. При этом необходимо обеспечить удаление d при движении точек O_5 и O_5' от верхней стенки трубопровода на расстоянии, равном 200 мм (рис. 1).

Теория. Пусть необходимо рассчитать приращение обобщенных координат Δq_i , позволяющих переместить точку $O_5 = A^i$ в следующую точку A^{i+1} заданной траектории f , по которой осуществляется движение точки O_5 . Точка A^i задает начальную точку участка траектории, на котором обеспечивается наклон режущей кромки O_5B к горизонтали, определяемый углом β (рис. 2). Траектория движения f находится на глубине h_3 от поверхности грунта и на безопасном расстоянии d от верхней кромки трубопровода (рис. 1). Известно, что между проекциями вектора скорости V^{05} (V_x^{05}, V_z^{05}) точки O_5

на неподвижные оси системы координат $O_0x_0z_0$ и приращениями обобщенных координат существует линейная зависимость [14–16]:

$$\begin{aligned} J_{11}\Delta q_1 + J_{12}\Delta q_2 + J_{13}\Delta q_3 &= V_x^{0,5} \\ J_{21}\Delta q_1 + J_{22}\Delta q_2 + J_{23}\Delta q_3 &= V_z^{0,5} \end{aligned} \quad (1)$$

где Δq_i — приращение обобщенных координат за одну итерацию, заданную промежутком времени t ; J_{ji} — коэффициенты матрицы частных передаточных отношений. На рис. 2 представлены траектории движения точек O_5 и B ковша, перемещение которых моделируется на участках, заданных точками A^iA^B и $A^B A^B$.

При движении ковша необходимо вначале обеспечить заданный угол наклона режущей кромки $\beta = 20^\circ$ на участке траектории, заданной точками A^i и A^B (рис. 2). После движения на траектории, заданной точками A^i и A^B с обеспечением угла β , необходимо далее изменять угол α по окончании процесса набора грунта ковшом (рис. 1, 2). Угол α определяется углом наклона отрезка O_4O_5 по отношению к вертикальной прямой.

Для обеспечения необходимой ориентации ковша в неподвижной системе координат используем третье линейное уравнение:

$$J_{31}\Delta q_1 + J_{32}\Delta q_2 + J_{33}\Delta q_3 = \omega_y \quad (2)$$

где J_{3i} — коэффициенты матрицы частных передаточных отношений; ω_y — угловая скорость поворота системы координат $O_5x_5z_5$, связанной с ковшом вокруг оси O_5y_5 , проходящей через точку O_5 . На рис. 1 ось O_5y_5 проецируется в точку O_5 . При движении

ковша на участке траектории, заданной точками A^t и A^B значение ω_y принимается равным нулю. На участке траектории, заданной точками A^B и A^a , принимается $\omega_y = 2^\circ/\text{сек}$.

На рис. 2 изображено положение точки O_5^T , задающей положение точки O_5 при реализации значений Δq_i , вычисленных по уравнениям (1) и (2). Отклонение положения точки O_5 от заданной траектории f обозначено параметром d^T . При совместном решении линейных уравнений (1) и (2) может возникнуть ситуация, когда значение параметра d^T получается больше заданной точности позиционирования δ центра выходного звена. Параметр d^T определяет удаление точки O_5^T , полученной реализацией значений Δq_i ($q_i = q_i + \Delta q_i$) за одну итерацию от заданной траектории f . Данный параметр вычисляется по формуле:

$$d^T = \frac{|a(r_0 - r_t)|}{|a|}, \quad (3)$$

где a — направляющий вектор прямой f , r_0 — радиус вектор точки O_5^T , r_t — радиус вектор точки A^t , через которую проходит прямая f .

Если значение d^T будет превышать заданную величину δ , необходимо уменьшить значение модуля вектора линейной скорости $|V^{05}|$. Значение параметра δ принимается в соответствии с заданным безопасным расстоянием d от точек O_5 и B ковша экскаватора до верхней стенки трубопровода. На рис. 3 представлена зависимость значения параметра d^T от смещения l_t точки O_5 по траектории f , заданной отрезком $A^t A^B$ по направлению, противоположному оси x_0 (рис. 2) [17–20]. На рис. 3 представлены графики функций $d^T = f(l_t)$ для различных значений модуля вектора скорости $|V^{05}|$. Анализ графиков функций (рис. 3) показывает, что оптимальным значением $|V^{05}|$ при расчете промежуточных конфигураций является значение $|V^{05}| = 1,5$ см/сек, так как отклонение от заданной траектории составляет около 2 см, что удовлетворяет заданным условиям безопасности.

Графики функций $d^T = f(l_t)$ построены на основе проведенных вычислительных экспериментов. При заданном горизонтальном направлении вектора скорости V^{05} для каждой точки $N(q_1^N, q_2^N, q_3^N)$, обеспечивающей заданный угол β , вычислялось значение параметра d^T .

На участке траектории, заданном точками $A^B A^a$, синтез движений происходит с изменением угла α на заданную величину $\Delta\alpha = 2^\circ$ за одну итерацию. Соответственно, на участке $A^a A^B$ также с изменением угла α на величину $\Delta\alpha = 2^\circ$, но со смещением целевой точки на высоту h (если угол β начинает принимать значение $\beta < 0$ (рис. 2):

$$h = O_5 O_5^B \cdot \cos(90^\circ - |\beta|). \quad (4)$$

Пусть угол β начинает принимать отрицательное значение. В этом случае точка O_5 будет расположена выше точки $O_5^B = B$. Следовательно, в качестве центра выходного звена необходимо принять точку O_5^B (точка B теперь будет располагаться ближе к верхней стенке трубопровода, чем точка O_5). При этом нужно перезадать модель кинематической цепи. В табл. 1, 2 представлены значения геометрических параметров, позволяющих задать модели кинематической цепи манипулятора экскаватора М2-2-2 и М2-2-2-8-10, когда в качестве центра

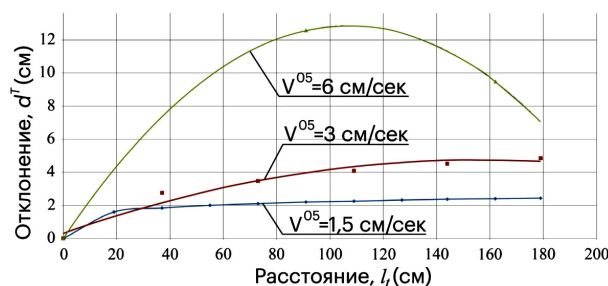


Рис. 3. Графики функции $d^T = f(l_t)$

Таблица 1

Геометрические параметры модели кинематической цепи для механизма М2-2-2 для случая, когда точка O_5 является центром выходного звена

Система координат	O_3	O_4	O_5
q_i	q_1	q_2	q_3
l_i , (см)	$l_1 = 600$	$l_2 = 281$	$l_3 = 161$
l_{smi} , (см)	0	0	0
n_{kod}	2	2	2

Таблица 2

Геометрические параметры модели кинематической цепи для механизма М2-2-2-8-10 для случая, когда точка O_5 является центром выходного звена

	O_3	O_4	O_5	O_5''	O_5'
q_i	q_1	q_2	q_3	0	0
l_i , (см)	$l_1 = 600$	$l_2 = 281$	0	0	0
l_{smi} , (см)	0	0	0	α_1	$l_3^B = 170$
n_{kod}	2	2	2	8	10

выходного звена принимается точка O_5 или точка $O_5^B = B$. Обозначения механизмов приняты в соответствии с методикой, представленной в работе [14].

В табл. 1, 2 параметры l_1 , l_2 и l_3 задают длины отрезков $O_2 O_3$, $O_3 O_4$ и $O_4 O_5$ (рис. 1.); l_{smi} — смещения вдоль осей координат или углы поворота при значениях параметра $n_{kod} = 7 \dots 9$ или $n_{kod} = 10 \dots 12$; n_{kod} — коды кинематических преобразователей [14]. Угол α_1 и длина l_3^B определяют положение точки B на ковше экскаватора (рис. 2). Точки O_2 , O_3 , O_4 , O_5 , O_5'' , O_5' задают соответственно центры систем координат, связанных со звеньями механизмов.

Результаты экспериментов. Для анализа области допустимых положений точки N^Q , определяющейся пересечением плоскостей Σ_1^Q , Σ_2^Q и Σ_3^Q , заданных линейными уравнениями (1) и (2) в пространстве приращений обобщенных координат Q были построены следы указанных плоскостей для различных положений механизма манипулятора экскаватора. В работе геометрические объекты, располагающиеся в пространстве приращений обобщенных координат, принято обозначать с индексом Q . Анализ полученных положений точек N^Q указал на то, что решение системы уравнений (1) и (2) удовлетворяет заданным требованиям, если указанная точка

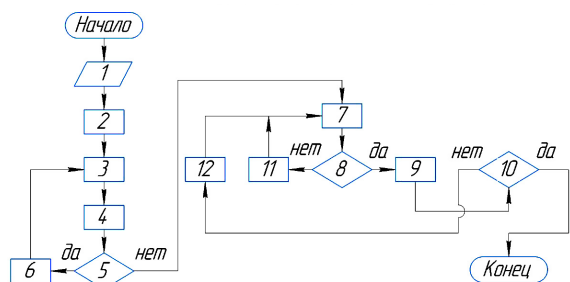


Рис. 4. Схема алгоритма синтеза движения механизма манипулятора экскаватора

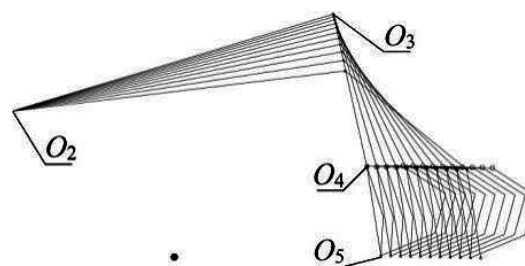
находится внутри сферы Ψ^Q с центром, совпадающим с началом координат пространства Q и радиусом, равным 9,5 град/сек. Если указанное условие не выполняется, необходимо изменять значения V_x^{05} , V_z^{05} и ω_y в сторону их уменьшения.

Это позволяет обеспечить заданную точность позиционирования.

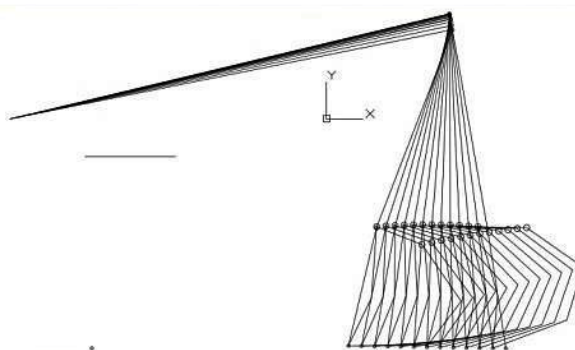
Схема алгоритма автоматического управления движением звеньев механизма манипулятора экскаватора представлена на рис. 4.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: 1 — ввод данных $l_1, l_2, l_3, l_3^B, \alpha_1, d, h_s, A^t, A^{ta}, A^{tb}, \beta$; 2 — расчет начальных значений q_1, q_2 и q_3 , обеспечивающих положение ковша, соответствующее заданному положению точки $O_5 = A^t$ и заданному углу β ; 3 — вычисление положения следующей точки A^{t+1} на заданной траектории f ; 4 — вычисление матрицы частных передаточных отношений (коэффициентов J_{ij}); 5 — точка O_5 принадлежит отрезку траектории, на котором обеспечивается значение угла β ($O_5 \in A^t A^t$); 6 — вычисление вектора $Q_1 (\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3)$ при решении системы уравнений (1) и (2), (синтез движений с заданной ориентацией $\omega_y = 0$, вычисление $q_i = q_i + \Delta q$ передача управляющей информации на гидроцилиндры, для обеспечения поворотов Δq_i в шарнирах). Определение принадлежности точки $N^Q \in \Psi^Q$; 7 — вычисление вектора $Q_2 (\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3)$ при изменении $\Delta \omega_y = 2^\circ/\text{сек}$, вычисление $q_i = q_i + \Delta q_i$ (передача управляющей информации на гидроцилиндры). Определение принадлежности точки $N^Q \in \Psi^Q$; 8 — значение угла $\beta < 0^\circ$; 9 — расчет вектора V^{05} при движении точки O_5 по участку траектории f_a , заданной точками $A^{ta} A^{tb}$. За центр выходного звена принимается точка $B = O_5'$; 10 — конечная точка траектории $A^{ta} A^{tb}$ достигнута; 11 — вычисление следующего положения точки A^t на заданной траектории $A^t A^{ta}$; 12 — вычисление коэффициентов J_{ij} и направления и модуля вектора скорости $V_x^{05} = h \cdot \text{tg} \psi$, $V_z^{05} = h$. Угол ψ определяется касательной к заданной траектории, которой является окружность f_a .

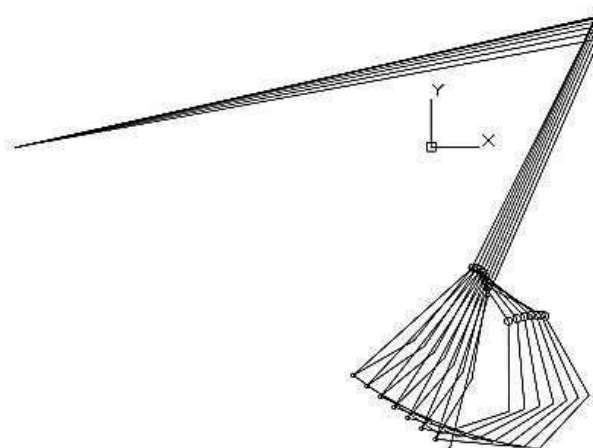
На рис. 5 представлены результаты синтеза движения ковша экскаватора на основе использования разработанного алгоритма. Геометрическое компьютерное моделирование выполнялось с использованием алгоритмического языка программирования AutoLISP и системы NanoCAD. Синтез движения обеспечивает заданное безопасное удаление от верхней кромки трубопровода. При построении движений изменялась также глубина установки ковша экскаватора h . Результаты компьютерного моделирования показали работоспособность алгоритма синтеза движений ковша на различных глубинах с обеспечением заданного удаления от верхней кромки трубопровода.



а)



б)



в)

Рис. 5. Результаты компьютерного геометрического моделирования движения рабочего оборудования экскаватора при значениях параметров: а) $\beta = 20^\circ$; б) $\Delta \alpha = 2^\circ$; в) моделирование движения по круговой траектории

Основные результаты и выводы. На основе геометрического моделирования определена область допустимых решений линейной системы уравнений, используемой при определении приращений обобщенных координат механизма на каждой итерации. Данную область задает сфера заданного радиуса с центром, совпадающим с началом координат пространства приращений обобщенных координат.

На основе проведенного геометрического компьютерного моделирования определено максимальное значение модуля вектора скорости точки, принадлежащей режущей кромке ковша, при котором достигается заданная точность позиционирования. Данное значение равно полутора сантиметрам в секунду за одну итерацию.

Разработан алгоритм синтеза движения экскаватора с изменением положения точек ковша, для

которых моделируется перемещения по заданным траекториям. Данный алгоритм обеспечивает заданное удаление ковша экскаватора от верхней кромки трубопровода.

Проведенные исследования могут быть использованы при разработке информационно-управляющих комплексов подвижных объектов, в частности при разработке автоматизированных систем управления движением рабочего оборудования экскаватора.

Библиографический список

1. Аладинский В. В., Малков А. Г., Ушаков А. В. Метод ремонта газопроводов с использованием труб, бывших в эксплуатации // Территория Нефтегаз. 2009. № 8. С. 56–60.
2. Булавинцева А. Д., Мазуркин П. М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 4. С. 64–67.
3. Tiratsoo J. About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2017. № 1. P. 82–83.
4. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // Engineering Structures. 2011. Vol. 33 (5). P. 1423–1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001.
5. Archibald I. C. Soil stabilizer // Pipeline and Gas Journal. 1984. No. 11. P. 44–46.
6. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. P. 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.
7. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015. Vol. 40, Issue 11. P. 3273–3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.
8. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // Frontiers in Energy. 2020. Issue 2. DOI: 10.1007/s11708-020-0672-5.
9. Charru F. Hydrodynamic Instabilities. Cambridge University Press, 2011. 391 p.
10. Amiya K. L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry // Applied Metallurgy and Corrosion Control. 2017. P. 269–347. DOI: 10.1007/978-981-10-4684-1_9.
11. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (1). P. 12–21. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21.
12. Аникин Е. А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 108 с.
13. Салюков В. В., Халыев Н. Х., Селиверстов В. Г. [и др.] Ремонт локальных участков трубопровода. Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 73 с.

14. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.

15. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2010. № 94 (4). P. 303–309. DOI: 10.1115/1.3426611.

16. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Способ преодоления тупиковых ситуаций при движении до целевой точки по произвольной траектории центра выходного звена // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 12. С. 3–9. DOI: 10.14489/vkit.2019.12.pp.003-009.

17. Притыкин Ф. Н. Исследование кинематических параметров андроида робота при автоматизированном синтезе движений по вектору скоростей // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-5-9.

18. Притыкин Ф. Н. Моделирование гиперповерхностей, отражающих взаимосвязь кинематических параметров механизма андроида робота // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19, № 7 (217). С. 21–29. DOI: 10.14489/vkit.2022.07.pp.021-029.

19. Вергинская Н. Д. Задачи геометрического моделирования технологических процессов. Москва: Издат. дом Академии естествознания, 2015. 132 с.

20. Иванов Г. С. Теоретические основы начертательной геометрии. Москва: Машиностроение, 1998. 158 с. ISBN 5-217-02673-1.

ПРИТЫКИН Федор Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Адрес для переписки: pritykin@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Илья Сергеевич, аспирант кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6890-3069

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Адрес для переписки: mrprogamer111@gmail.com

Для цитирования

Притыкин Ф. Н., Кузнецов И. С. Геометрическое моделирование процессов выполнения подкопочных работ экскаватором с целью предотвращения повреждения стенки трубопровода // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-28-34.

Статья поступила в редакцию 30.01.2023 г.

© Ф. Н. Притыкин, И. С. Кузнецов

GEOMETRIC MODELING OF THE PROCESSES OF EXCAVATION BY AN EXCAVATOR IN ORDER TO PREVENT DAMAGE TO THE PIPELINE WALL

When controlling the motion of the excavator bucket, the operator controls the translational motions in the hydraulic cylinders, which are generally independent. However, ensuring the motion of the cutting edge of the bucket along a given trajectory (for example, along a horizontal straight line) requires certain skills and additional concentration of attention from the operator. This significantly affects the fatigue of the operator during these works. In this case, it becomes relevant to solve the problem of developing an automated control system that makes it possible to calculate the change in the angles of rotation in the rotary joints of the excavator, which provide the specified motion of the bucket. In this case, the operator can only indicate the start and target points of the trajectory and the direction of motion of the bucket. In the article, based on the research, an algorithm has been developed that allows you to simulate the motion of points of an excavator bucket with a given distance from the upper edge of the pipeline. The results of computer simulation of the motion of the excavator manipulator are presented.

Keywords: motion synthesis, excavator arm mechanism, geometric modeling, pipeline repair, computer simulation of motions, output link.

References

1. Aladinskiy V. V., Malkov A. G., Ushakov A. B. Metod remonta gazoprovodov s ispol'zovaniyem trub, byvshikh v ekspluatatsii [Method for repairing gas pipelines using second-hand pipes] // *Territoriya Neftegaz. Neftegas Territory*. 2009. No. 8. P. 56–60. (In Russ.).
2. Bulavintseva A. D., Mazurkin P. M. Dinamika avariy po prichinennomu ushcherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO AK «Transneft'» [Dynamics of accidents caused by damage on the linear part of Transneft's main oil pipelines] // *Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii. Modern Knowledge-Intensive Technologies*. 2011. No. 4. P. 64–67. (In Russ.).
3. Tiratsoo J. About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017. No. 1. P. 82–83. (In Engl.).
4. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // *Engineering Structures*. 2011. Vol. 33 (5). P. 1423–1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001. (In Engl.).
5. Archibald I. C. Soil stabilizer // *Pipeline and Gas Journal*. 1984. No. 11. P. 44–46. (In Engl.).
6. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016. P. 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2. (In Engl.).
7. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015. Vol. 40, Issue 11. P. 3273–3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9. (In Engl.).
8. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // *Frontiers in Energy*. 2020. Issue 2. DOI: 10.1007/s11708-020-0672-5. (In Engl.).
9. Charru F. *Hydrodynamic Instabilities*. Cambridge University Press, 2011. 391 p. (In Engl.).
10. Amiya K. L. Material Selection and Performance in Oil and Gas Industry // *Applied Metallurgy and Corrosion Control*. 2017. P. 269–347. DOI: 10.1007/978-981-10-4684-1_9. (In Engl.).
11. Demidenko A. I., Kuznetsov I. S. Sovershenstvovaniye konstruktssii rabochego oborudovaniya gidravlicheskogo ekskavatora [Improvement of the hydraulic excavator's working equipment] // *Vestnik SibADI. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. Vol. 17 (1). P. 12–21. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21. (In Russ.).
12. Anikin E. A. Effektivnyye metody remonta magistral'nykh truboprovodov [Effective repair methods for trunk pipelines]. Moscow, 2001. 108 p. (In Russ.).
13. Salyukov V. V., Khallyyev N. Kh., Seliverstov V. G. [et al.]. Remont lokal'nykh uchastkov truboprovoda [Repair of localised pipeline sections]. Moscow, 2001. 73 p. (In Russ.).
14. Pritykin F. N. Virtual'noye modelirovaniye dvizheniy robotov, imeyushchikh razlichnuyu strukturu kinematcheskikh tsepey [Virtual simulation of robot movements with different kinematic chain structures]. Omsk, 2014. 172 p. (In Russ.).
15. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2010. No. 94 (4). P. 303–309. DOI: 10.1115/1.3426611. (In Engl.).

16. Pritykin F. N., Nebritov V. I. Sposob preodoleniya tupikovykh situatsiy pri dvizhenii do tselevoy tochki po proizvol'noy trayektorii tsentra vykhodnogo zvena [Method for overcoming the dead ends during movements to the target point along an arbitrary trajectory of the output link center] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2019. No. 12. P. 3–9. DOI: 10.14489/vkit.2019.12.pp.003-009. (In Russ.).

17. Pritykin F. N. Issledovaniye kinematicheskikh parametrov androidnogo robota pri avtomatizirovannom sinteze dvizheniy po vektoru skorostey [Study of kinematic parameters of android robot in automated synthesis of motions on velocity vector] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 2 (182). P. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-5-9. (In Russ.).

18. Pritykin F. N. Modelirovaniye giperpoverkhnostey, otrazhayushchikh vzaimosvyaz' kinematicheskikh parametrov mekhanizma androidnogo robota [Simulation of hypersurfaces based on the database of kinematic parameters of the android robot mechanism] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2022. Vol. 19, no. 7 (217). P. 21–29. DOI: 10.14489/vkit.2022.07.pp.021-029. (In Russ.).

19. Vertinskaya N. D. Zadachi geometricheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov [The tasks for geometric modelling of technological processes]. Moscow, 2015. 132 p. (In Russ.).

20. Ivanov G. S. Teoreticheskiye osnovy nachertatel'noy geometrii [Theoretical foundations of descriptive geometry]. Moscow, 1998. 158 p. ISBN 5-217-02673-1. (In Russ.).

PRITYKIN Fedor Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Engineering Geometry and CAD Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 7628-8023

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

ORCID: 0000-0001-8081-6840

Correspondence address: pritykin@mail.ru

KUZNETSOV Ilya Sergeevich, Graduate Student of Engineering Geometry and CAD Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6890-3069

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Correspondence address: mrprogamer111@gmail.com

For citations

Pritykin F. N., Kuznetsov I. S. Geometric modeling of the processes of excavation by an excavator in order to prevent damage to the pipeline wall // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-28-34.

Received January 30, 2023.

© F. N. Pritykin, I. S. Kuznetsov