

УДК 621.22-546; 67.05; 681.5.09

СОГЛАСОВАНИЕ ОСЕЙ ОБЪЕКТА И МАНИПУЛЯТОРА ПРИ ГИДРОРЕЗАНИИ НЕФТЕПРОВОДОВ

¹Архипов А.Н., ²Кобзев А.А., ²Еропова Е.В., ²Лекарева А.В., ²Махфуз А.А.

¹ООО «Грот», Владимир, e-mail: oogrot@front.ru;

²ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: kobzev42@mail.ru

Ремонтные и контрольно-профилактические работы являются одной из важнейших составляющих процесса эксплуатации нефтепроводов и связанных с ними нефтехранилищ. Осуществление данных работ сопряжено с вырезанием полостей больших размеров и сложных форм. Применение процесса гидрорезания водной струей с абразивом, реализуемого специализированным мобильным технологическим роботом, является в данном случае наиболее целесообразным и эффективным методом. Одной из важнейших задач управления технологическим манипулятором гидрорезания является обеспечение заданной точности движения по технологической траектории. Однако существует большая вероятность несовпадения программно заданной траектории резания с действительной, обусловленная главным образом неопределенностью расположения поверхности резания в пространстве, а также ее возможными деформациями. В этом случае особую значимость приобретает адаптация программной технологической траектории к фактической, для осуществления которой необходимо обеспечить: 1) согласование системы координат объекта и базовой системы координат манипуляционного робота; 2) согласование осей системы координат объекта резания и ввод соответствующих поправок в управляющую программу. Согласование осей базовой системы координат, связанной с основанием манипуляционного робота, с системой координат трубопровода реализуется с помощью определения однородной матрицы преобразования, определяющей ориентацию системы координат объекта относительно базовой системы координат. Согласование же осей системы координат объекта резания и определение соответствующих поправок в управляющей программе реализуется с помощью метода двух сечений. В основе его лежат поисковые движения с контролем конечных точек на технологической поверхности, фиксации линейных и угловых отклонений координатных осей в плоскости и пространстве. Применение данного метода позволяет парировать траекторные ошибки, обусловленные несовпадением расчетного и фактического значения начальной (контрольной) точки технологической траектории, а также отклонением фактической продольной оси трубопровода относительно расчетной.

Ключевые слова: гидрорезание поверхностей нефтепроводов и нефтехранилищ, технологический робот, поверхность резания, технологическая траектория, однородные преобразования, согласование систем координат, метод двух сечений

COORDINATION OF AXES OF OBJECT AND THE MANIPULATOR WHEN HYDROCUTTING OIL PIPELINES

¹Arkhipov A.N., ²Kobzev A.A., ²Eroпова E.V., ²Lekareva A.V., ²Makhfuz A.A.

¹Limited liability «Grotto», Vladimir, e-mail: oogrot@front.ru;

²Vladimir State University of a name of A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, e-mail: kobzev42@mail.ru

Repair and control scheduled maintenance is one of the most important components of process of operation of oil pipelines and the related oil storages. Implementation of these works is interfaced to cutting of cavities of the big sizes and difficult forms. The most expedient and effective method is application of process of the hydrocutting by a water stream with an abrasive realized by the specialized mobile technological robot. One of the most important problems of the technological manipulator of hydrocutting control is ensuring the set accuracy of the movement on a technological trajectory. However, there is a high probability of discrepancy programmatically of the set cutting trajectory with valid, caused, mainly, by uncertainty of an arrangement of a surface of cutting in space, and its also possible deformations. In this case the special importance is gained by adaptation of a program technological trajectory to actual for which implementation it is necessary to provide: 1) coordination of system of coordinates of object and basic system of coordinates of the handling robot; 2) coordination of axes of system of coordinates of object of cutting and input of the relevant amendments in управляющую the program. Coordination of axes of the basic system of coordinates connected with the basis of the handling robot with system of coordinates of the pipeline is realized by means of definition of the uniform matrix of transformation defining orientation of system of coordinates of object of rather basic system of coordinates. Coordination of axes of system of coordinates of object of cutting and definition of the relevant amendments to the operating program is realized by means of a method of two sections. The search movements with control of final points on a technological surface, fixing of linear and angular deviations of coordinate axes in the plane and space are the cornerstone of it. Application of this method allows to parry the trajectory mistakes caused by discrepancy of calculated and actual value of an initial (control) point of a technological trajectory, and also a deviation of the actual longitudinal axis of the pipeline of rather settlement.

Keywords: hydrocutting of surfaces of oil pipelines and oil storages, technological robot, cutting surface, technological trajectory, uniform transformations, coordination of systems of coordinates, method of two sections

Ремонтные и контрольно-профилактические работы являются одной из важнейших составляющих процесса эксплуатации нефтепроводов и связанных с ними нефтехранилищ. Осуществление данных работ сопряжено с вырезанием полостей больших

размеров и сложных форм. При этом не допускается, вследствие присутствия горючих отложений на внутренних поверхностях нефтепроводов, использование для их резки методов, сопровождающихся пламенем и искрой (электро- и газорезка, лазерная резка). Применение процесса гидрорезания водной струей с абразивом, реализуемого специализированным мобильным технологическим роботом, является в данном случае наиболее целесообразным и эффективным методом. Особенность задачи состоит в организации управления мобильным технологическим роботом в условиях неопределенности рельефа местности в малом для транспортного робота и неопределенности пространственного расположения поверхности резания для объекта резания, а также в условиях ограничений со стороны элементов конструкции нефтепроводов и нефтехранилищ.

Регулируемой координатой системы являются координаты режущей кромки гидрореза, перемещаемого по технологической траектории над поверхностью резания. Требования к системе управления технологическим роботом определяются габаритами и видом поверхностей объекта гидрорезания, точностью движения по технологической поверхности, а также необходимостью обеспечения стабилизации расстояния режущей кромки головки гидрореза от технологической поверхности. Ошибки траекторного перемещения головки определяются векторными ошибками выхода в исходную точку МР и непосредственно перемещения головки ТР [1].

Очевидно, что вид вырезаемых поверхностей определяет траектории движения головки гидрореза. Для нефтехранилищ – это прямоугольные поверхности при виде по нормали спереди с максимальными размерами 4×3 м или прямоугольник с размерами 0,5×1 м. При этом образующие представляют собой: по вертикали – прямую линию, по горизонтали – окружность (наружный профиль). Для трубопроводов – это прямоугольник с размерами до 0,5×1,0 м или окружность при виде по нормали к поверхности с размерами до максимального диаметра трубы. В последнем случае имеем поверхность в виде пересечения двух цилиндров под прямым углом и эллипс при другом угле. Типоразмеры труб 200–1200 мм [3].

При управлении траекторией движения головки гидрореза по не полностью определенной поверхности резания в пространстве следует, прежде всего, рассматривать параметры движения в большом и в малом. Параметры рельефа в большом для МР могут быть получены с помощью системы тех-

нического зрения или системы спутниковой навигации. Для определения параметров движения в малом, при тактическом управлении мобильным роботом, необходимо применять как аппаратные средства, в виде системы технического зрения, так и алгоритмы, программные продукты, прогнозирующие рельеф местности.

Определение координат расположения поверхности резания в пространстве может быть реализовано с помощью нескольких вариантов. Один из них подразумевает пробный проход или движения головки гидрореза с информационными датчиками контроля расстояния от поверхности и соответствующей обработкой этой информации. Другой вариант определения координат расположения поверхности резания состоит в пробном или рабочем движении с использованием алгоритмов прогнозирующего управления [2].

Таким образом, одной из важнейших задач управления технологическим манипулятором гидрорезания является обеспечение заданной точности движения по технологической траектории. Однако существует большая вероятность несовпадения программно заданной траектории резания с действительной, обусловленная главным образом неопределенностью расположения поверхности резания в пространстве, а также ее возможными деформациями. В этом случае особую значимость приобретает адаптация программной технологической траектории к фактической, для осуществление которой необходимо обеспечить:

1. Согласование системы координат объекта (трубопровода) и базовой системы координат манипуляционного робота (системы координат, связанной с основанием манипулятора).

2. Согласование осей системы координат объекта резания и ввод соответствующих поправок в управляющую программу.

Рассмотрим решение задачи поэтапно.

1. Согласование системы координат объекта (трубопровода) и базовой системы координат манипуляционного робота (системы координат, связанной с основанием манипулятора). Первым шагом при осуществлении согласования системы координат объекта и системы координат манипуляционного робота является определение их взаимной ориентации и положения в пространстве. При этом возможны два варианта:

а) оси базовой системы координат сонаправлены осям системы координат объекта;

б) направление осей базовой системы координат не совпадает с направлением осей координат трубопровода. Оба варианта представлены на рис. 1.

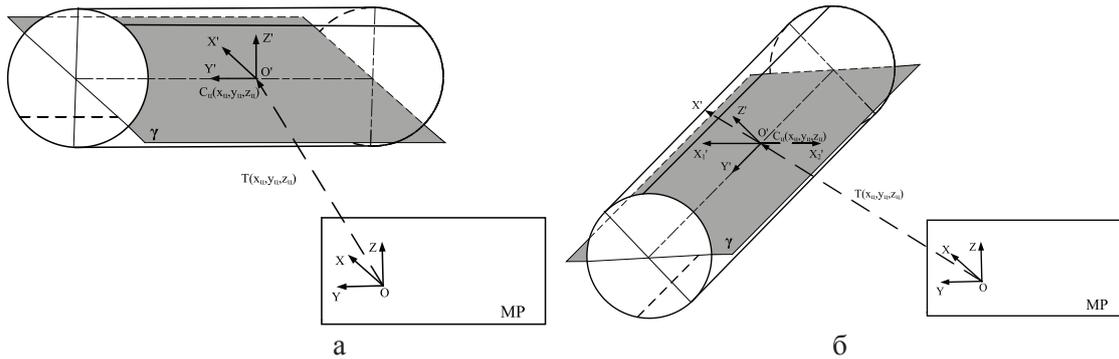


Рис. 1. Взаимное расположение и ориентация осей систем координат трубопровода и манипуляционного робота:
 а – оси базовой системы координат сонаправлены осям системы координат объекта;
 б – направление осей базовой системы координат не совпадает с направлением осей координат трубопровода

Матрица перехода из базовой системы координат в систему координат объекта в общем случае имеет вид

$$M_{Б,Ц} = \begin{bmatrix} R_{Б,Ц_{3 \times 3}} & T_{Б,Ц_{3 \times 1}} \\ 0_{3 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $R_{Б,Ц}$ – матрица поворота размерностью 3×3 , преобразующая базовую систему координат в систему координат целевой точки. Она образована направляющими косинусами и определяет поворот базовой системы координат относительно системы координат объекта; $T_{Б,Ц}$ – подматрица размерностью 3×1 представляет собой вектор положения начала координат повернутой системы отсчета относительно базовой.

Для представления матриц поворота наиболее целесообразно применять углы Эйлера [6, 7]. Существует много различных

систем углов Эйлера, и все они описывают ориентацию твердого тела относительно некоторой заданной системы координат. Будем использовать систему углов Эйлера составляющих так называемые углы крена, тангажа и рысканья. Преимущество описания ориентации с использованием углов Эйлера состоит в том, что вся информация о положении и ориентации объекта в пространстве содержится в шестимерном векторе $XYZ_{\phi\theta\psi}$. Они соответствуют следующей последовательности поворотов:

- 1) поворот на угол ψ вокруг оси OX ($R_{x,\psi}$) (рысканье);
- 2) поворот на угол θ вокруг оси OY ($R_{y,\theta}$) (тангаж);
- 3) поворот на угол ϕ вокруг оси OZ ($R_{z,\phi}$) (крен) [4].

Результирующая матрица поворота имеет следующий вид:

$$M_{\phi,\theta,\psi} = R_{z,\phi} \cdot R_{y,\theta} \cdot R_{x,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \psi \sin \theta - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \psi \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \psi \sin \theta + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Зная трехмерную матрицу поворота и учитывая равенство, представляющее собой выражение этой матрицы, через углы Эйлера можно определить соответствующие значения углов ϕ, θ, ψ . Применяя обратную тригонометрическую функцию двух аргументов, а также общее решение, предложенное Полом и др. [5], получим

$$\phi = \arctg \left[\frac{x_y}{x_x} \right] = ATAN2(x_y, x_x); \quad (3)$$

$$\psi = \arctg \left[\frac{\sin \psi}{\cos \psi} \right] = \arctg \left[\frac{\sin \phi \cdot z_x - \cos \phi \cdot z_y}{\cos \phi \cdot y_y - \sin \phi \cdot y_x} \right] = \quad (4)$$

$$= ATAN2(\sin \phi \cdot z_x - \cos \phi \cdot z_y, \cos \phi \cdot y_y - \sin \phi \cdot y_x);$$

$$\theta = \arctg \left[\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right] = \arctg \left[\frac{-x_z}{\cos \phi \cdot x_x + \sin \phi \cdot x_y} \right] = ATAN2(-x_z, \cos \phi \cdot x_x + \sin \phi \cdot x_y); \quad (5)$$

где $\overline{O'X'} = (x_x, x_y, x_z)$; $\overline{O'Y'} = (y_x, y_y, y_z)$ и $\overline{O'Z'} = (z_x, z_y, z_z)$ – ортонормированный базис системы координат, связанной с целевой точкой, заданный в базовой системе координат.

Результирующая матрица преобразования, связывающая базовую систему координат и систему координат объекта, имеет вид

$$M_{\text{Б,Ц}} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi & x_{\text{ц}} \\ \sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \psi \sin \theta + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & y_{\text{ц}} \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_{\text{ц}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Фактически на данном этапе решения поставленной задачи наибольшее значение имеет угол φ , поскольку данная величина должна быть введена в качестве поправки в степень подвижности манипулятора, осуществляющей поворот технологического робота относительно вертикальной оси OZ в виде

$$q_1 = q_1 + \varphi. \quad (7)$$

2. Согласование осей системы координат объекта резания и ввод соответствующих поправок в управляющую программу. Для решения поставленной задачи рассмотрим процесс движения исполнительного устройства (ИУ) манипулятора по технологической траектории резания, представленный на рис. 2. Технологическая траектория на рис. 2

представлена точками A_1-A_4 . Однако начальная точка подвода инструмента A_1 в подавляющем большинстве случаев не совпадает с программно заданной, в силу деформации поверхности резания, неопределенности ее расположения в пространстве и т.п. Анализируя процесс движения ИУ, можно заключить, что возможные траекторные ошибки связаны прежде всего с несовпадением

расчетного и фактического значения начальной (контрольной) точки технологической траектории, а также с отклонением фактической продольной оси трубопровода относительно расчетной. Обобщение вышеизложенного позволяет сделать вывод, что для согласования осей системы координат объекта и определения соответствующих поправок необходимо найти:

1) смещения центра системы координат образующей окружности трубы в сечении, перпендикулярном плоскости манипулятора в точке выхода;

2) не параллельность фактической продольной оси трубы относительно расчетной в плоскостях XOZ , YOZ , с центром, расположенным в центре образующей окружности трубы точке выхода, характеризующаяся углами отклонения соответственно $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$.

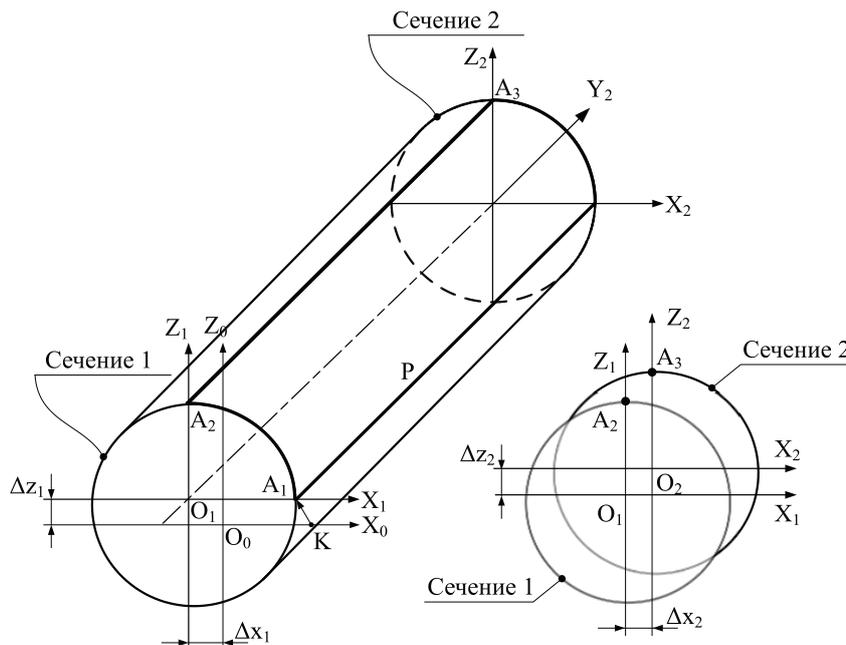


Рис. 2. Согласование осей системы координат объекта

Рассмотрим сечение 1. В случае несопадения координат расположения расчетного O_0 и фактического O_1 центров окружностей необходим перевод ИУ в точку A_1 . Эта точка соответствует пересечению фактической горизонтальной оси системы координат X_1, Y_1, Z_1 с окружностью трубы, являясь экстремальной в части значения координаты Y в вертикальной плоскости. При известном радиусе трубы расчетным путем определяются координаты фактического центра O_1 окружности в сечении 1. Фактические координаты центра O_1 позволяют найти смещения центра окружности по осям на величины $\Delta x_1, \Delta z_1$ как разности по соответствующим осям координат центров точек O_0 и O_1 . Входными параметрами при реализации процесса движения по технологической траектории являются программно заданные координаты траектории резания. Для коррекции, связанной с точкой движения, необходимо ввести поправки в виде Δx_1 и Δz_1 в соответствующие программные координаты, определяемые в виде управляющих зависимостей для всех степеней подвижности технологического робота при решении обратной задачи кинематики:

$$\begin{aligned} x_p^* &= x_p + \Delta x_1; \\ z_p^* &= z_p + \Delta z_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее переводим ИУ в вертикальное положение, характеризуемое точкой A_2 пересечения вертикальной оси системы координат X_1, Y_1, Z_1 с окружностью. Движение выполняется в режиме программного управления или по алгоритму контурного движения в автономном режиме. Из точки A_2 переходим по образующей цилиндра (трубы) на величину r в точку A_3 , записывая координаты центра окружности X_2, Y_2, Z_2 . Для определения смещения продольной оси воспользуемся наложением сечений 1 и 2 (смещение центров по осям $X, Z - \Delta x_2, \Delta z_2$). Заключительным шагом находим углы смещения осей как

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \arcsin \frac{\Delta z_2}{p}; \\ \Delta\beta &= \arcsin \frac{\Delta x_2}{p}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для реализации коррекции, связанной с обеспечением согласования осей системы координат объекта, необходимо вводить дополнительные поправки в координаты движения головки гидрореза в виде $\Delta x_2, \Delta z_2$:

$$\begin{aligned} x &= x_p^* + \sin \Delta\alpha \cdot y_r; \\ y &= y_r; \\ z &= z_p^* + \sin \Delta\beta \cdot y_r, \end{aligned} \quad (10)$$

где y_r – текущее значение координаты y .

Рассматриваемый алгоритм относится к поисково-аналитическим алгоритмам. Данный метод назовем методом двух сечений. В основе его лежат поисковые движения с контролем конечных точек на технологической поверхности, фиксации линейных и угловых отклонений координатных осей в плоскости и пространстве. Поисковые движения выполняются непосредственно манипулятором, контроль необходимых параметров и фиксация значений определяются информационно-измерительной системой, построенной по принципу дифференциальной вилки.

Выводы

1. Особенность задачи управления специализированным мобильным технологическим роботом, реализующим процесс гидрорезания, состоит в организации управления в условиях неопределенности рельефа местности в малом для транспортного робота и неопределенности пространственного расположения поверхности резания для объекта резания, а также в условиях ограничений со стороны элементов конструкции нефтепроводов и нефтехранилищ.

2. Несовпадение программно заданной траектории резания с действительной, а следовательно, возможные ошибки, обусловлены главным образом неопределенностью расположения поверхности резания в пространстве, а также ее возможными деформациями. При этом особую значимость приобретает адаптация программной технологической траектории к фактической, для осуществления которой необходимо обеспечить:

1) согласование системы координат объекта (трубопровода) и базовой системы координат манипуляционного робота (системы координат, связанной с основанием манипулятора);

2) согласование осей системы координат объекта резания и ввод соответствующих поправок в управляющую программу;

3) согласование осей базовой системы координат, связанной с основанием манипуляционного робота, с системой координат трубопровода реализуется с помощью определения однородной матрицы преобразования, определяющей ориентацию системы координат объекта относительно базовой системы координат;

4) согласование осей системы координат объекта резания и определение соответствующих поправок в управляющей программе осуществляется с помощью метода двух сечений. В основе его лежат поисковые движения с контролем конечных точек на технологической поверхности, фиксации линейных и угловых отклонений координатных осей в плоскости и пространстве. Применение данного метода позволяет парировать траекторные ошибки, обусловленные несовпадением расчетного и фактического значения начальной (контрольной) точки технологической траектории, а также отклонением фактической продольной оси трубопровода относительно расчетной.

Список литературы

1. Анализ роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов / А.Н. Архипов, А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз, Е.Н. Петухов // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2014. – № 6. URL: <http://www.science-education.ru/120-15697> (дата обращения: 03.12.14).
2. Задачи управления мобильным технологическим роботом гидрорезания нефтепроводов / А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз, О.В. Обидинина // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. 20–21 нояб. 2014 г. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. – С. 330–332. – ISBN 978-5-9984-0549-5.
3. Кобзев А.А., Петухов Е.Н., Махфуз А.А. Концепция роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов // Интеллектуальные системы 2014: труды XI Международного симпозиума. – М.РУДН, 2014. – С. 356–359.
4. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. – М.: Мир, 1985. – 286 с. ISBN 5-1605794.
5. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. – М.: Наука, 1976. – 104 с.
6. Разработка управляющих программ промышленных роботов / А.С. Климчик, Р.И. Гомолицкий, Ф.В. Фурман, К.И. Семкин. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2008. – 131 с.

7. Шахинпур М. Курс робототехники. – М.: Мир, 1990. – 527 с., ил. ISBN 5-03-001375-X.

References

1. Arhipov A.N., Kobzev A.A., Lekareva A.V., Mahfuz A.A., Petuhov E.N. Analiz robotizacii processa gidrorezanija nefteprovodov [Analysis of robotics process waterjet cutting oil], *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija: jelektronnyj nauchnyj zhurnal*, 2014. no 6. URL: <http://www.science-education.ru/120-15697>.
2. Kobzev A.A., Lekareva A.V., Mahfuz A.A., Obidinina O.V. Zadachi upravlenija mobilnym tehnologicheskim robotom gidrorezanija nefteprovodov [Objectives of controlling a mobile robot technology waterjet cutting oil], *Aktualnye problemy jekspluatacii avtotransportnyh sredstv: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. Konferencii, Vladimir*, 2014. pp. 330–332. ISBN 978-5-9984-0549-5.
3. Kobzev A.A., Petuhov E.N., Mahfuz A.A. Konceptija robotizacii processa gidrorezanija nefteprovodov [Concept of robotization of process of hydrocutting of oil pipelines], *Trudy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Intellektualnye sistemy 2014»*, Moscow, RUDN, 2014. pp. 356–359.
4. Kuafe F. Vzaimodejstvie robota s vneshnej sredoj [Interactions with the external environment of the robot], Moscow, 1985. 286 p. ISBN 5-1605794.
5. Pol R. Modelirovanie, planirovanie traektorij i upravlenie dvizheniem robota-manipuljatora [Modeling, path planning and motion control of a robot manipulator], Moscow, 1976. 104 p.
6. Klimchik A.S., Gomolickij R.I., Furman F.V., Sjomkin K.I. Razrabotka upravljajushih programm promyshlennyh robotov [The development of control programs of industrial robots], Minsk, 2008. 131 p.
7. Shahinpur M. Kurs robototekhniki [Robotics course], Moscow, 1990. 527 p. ISBN 5-03-001375.

Рецензенты:

Гоц А.Н., д.т.н., профессор кафедры «Тепловые двигатели и энергетические установки», ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир;

Кульчицкий А.Р., д.т.н., доцент, главный специалист, ООО «Завод инновационных продуктов «Концерн тракторные заводы»», г. Владимир.