

НОВЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРНОГО УСТРОЙСТВА БАТИСКАФА «ПОИСК-2»

А.С. Григорьев

andregrygoriev656@mail.ru

SPIN-код: 5404-0648

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено применение электрогидравлических манипуляционных комплексов из состава необитаемого подводного аппарата «Поиск-2» для проекта по добыче полиметаллических руд на глубоководье. Описаны существующие технологии в этой области, проведен анализ их преимуществ и недостатков. Предложена идея по более рациональному составу спускаемой техники, в которой потребуются применить модернизированные манипуляционные комплексы, для чего они должны иметь комбинированное дистанционно-автоматическое управление. Для разработки проекта нового манипулятора решена обратная задача кинематики, представлены функциональная схема работы новой системы управления, описание ее работы и основные характеристики, а также модель движения объектов управления, включающая физические тела, исполнительные гидроприводы и законы управления.

Ключевые слова

Подводная робототехника, манипулятор, система управления, кинематика, электрогидравлический привод, матрица преобразования, модель, автоматическое управление

Поступила в редакцию 17.05.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

В период с 1975 по 1981 г. были созданы гидрокомплексы глубоководных аппаратов «Поиск-2», «Поиск-6» и другие, предназначенные для научных и спасательных работ на больших глубинах [1]. В состав аппарата «Поиск-2» входили два копирующие манипуляторных электрогидравлических устройства с дистанционным управлением и силовым очувствлением. Они обладали совершенным для того времени конструктивным исполнением и широкими возможностями. Тем не менее возможности их эксплуатации были ограничены уровнем современных им технологий. До недавнего времени сфера применения необитаемых подводных аппаратов не выходила за рамки научных исследований, киносъемок и прокладки коммуникаций.

Современный уровень технологий позволяет перейти к новым методам извлечения ресурсов из-под толщи воды. Сегодня разрабатываются роботизированные комплексы, позволяющие вести добычу редких полиметаллических руд вдали от берега. В их создании лидирует компания Nautilus Minerals с проектом Solwara 1 в море Бисмарка в экономической зоне Папуа-Новой Гинеи.

Схема добычи, предложенная специалистами Nautilus, основана на водно-шламовой схеме добычи руды и включает в себя 227-метровый корабль, осуществляющий доставку оборудования к карьеру, спуск и подъем машин, подъем и осушение груза; а также систему подъема шлама и три специализированных донных робота [2].

Подводная техника представляет собой три дистанционно управляемых машины на гусеничном ходу (рис. 1). Подготовительная врубовая машина Auxiliary Cutter оборудована двоярным фрезерным рыхлителем на длинной поворотной балке. Она должна сформировать ровную площадку для будущего карьера и срезать неровности рельефа. Врубная машина Bulk Cutter массой 310 т с массивным режущим барабаном вскрывает, дробит и грейдирует породу в валы. Для сбора измельченного шлама и поднятия на судно через насосную станцию требуется применять специальную группирующую машину Collecting Machine с помпой, соединенной со вспомогательной насосной станцией гибким рукавом.



Рис. 1. Auxiliary Cutter, Bulk Cutter и Collecting Machine

В данной схеме имеются принципиальные недостатки. Во-первых, неисправность в работе любого компонента системы прекращает весь производственный цикл. Во-вторых, каждый робот может выполнять лишь один технологический этап. И в-третьих, стоимость всех трех роботов составляет около 100 млн долл. США.

Для решения этих проблем предлагается рационализировать материальную часть спускаемого оборудования. Компоновка всех трех машин схожа и представляет собой гусеничную платформу однотипных габаритов, на которую установлен рабочий орган машины: вал с вращающимся режущим инструментом у Auxiliary Cutter и Bulk Cutter или направляющая для помпы у Collecting Machine. Используя сменный рабочий инструмент и одну гусеничную платформу, можно обойтись одним многофункциональным агрегатом вместо трех специализированных (рис. 2).

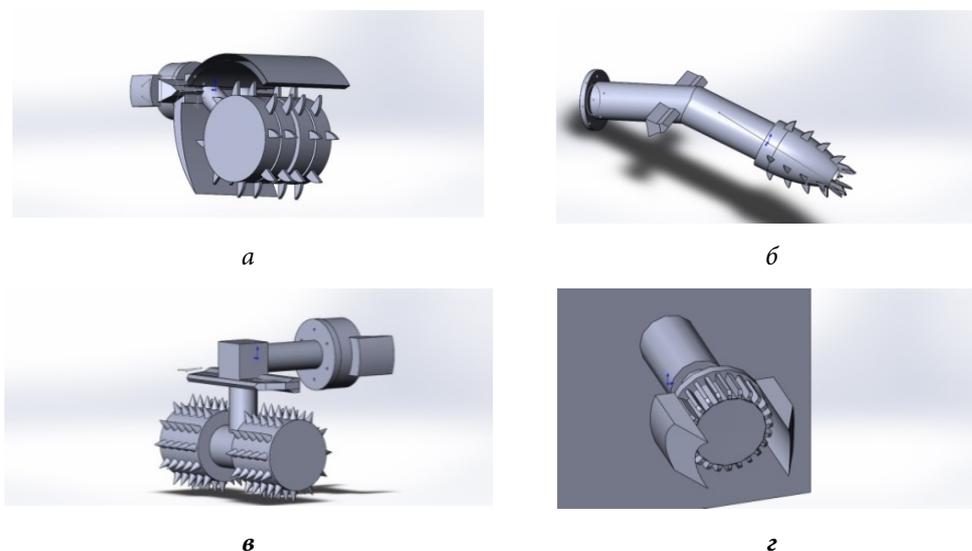


Рис. 2. Сменный инструмент:

a — режущий барабан; *б* — помпа; *в* — фрезерный рыхлитель;
г — вал машины для установки барабана или рыхлителя

Предлагается следующая схема работы. По прибытии базового судна на место оно спускает двух роботов в конфигурации грейдеров, которые готовят котлован площадью порядка 50×50 м и глубиной 1 м. В котлован спускают бетонные блоки, которые образуют фундамент с выемкой в центре размером около 26×6,5×0,5 м. В этот проем опускают ангар с креплениями для сменных рабочих инструментов (рис. 3). Для операции по смене инструмента используют два электрогидравлических манипулятора на основе проекта «Поиск-2». Их питание осуществляется с помощью насосной станции, которая поднимает шламовую смесь на судно. Манипуляторы передвигаются вдоль ангара по рельсам в его верхней части. Более подробно особенности подводных манипуляторов описаны в [3].

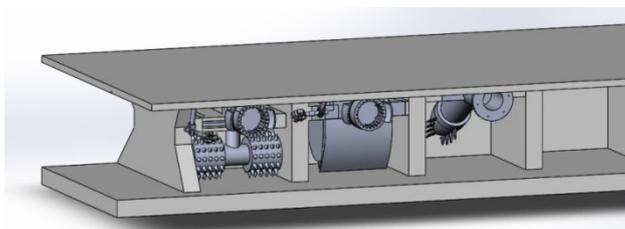


Рис. 3. Ангар с набором инструментов

Первый этап соединения грейдера и его сменного инструмента — его сближение с ангаром с помощью направляющих по горизонтали и вертикали до стыковки шлицевого соединения вала машины с инструментом. Второй этап — завинчивание/отвинчивание с помощью манипуляторов болтов, соединяющих инструмент с валом робота, причем болты подпружинены и соединены с валом

машины. Болты не нагружены моментом кручения вала — он передается через шлицевое соединение.

Манипулятор состоит из четырех последовательно соединенных звеньев (рис. 4). Он имеет следующие степени подвижности:

- движение по рельсам от 0 до 20 м (система отсчета (СО) $O_1X_1Y_1Z_1$);
- ротация плеча $\pm 95^\circ$ (СО $O_2X_2Y_2Z_2$);
- качание плеча от $+45^\circ$ до -90° (СО $O_3X_3Y_3Z_3$);
- качание предплечья от 0° до $+135^\circ$ (СО $O_4X_4Y_4Z_4$);
- ротация кисти $\pm 85^\circ$ (СО $O_5X_5Y_5Z_5$);
- качание кисти $\pm 90^\circ$ (СО $O_6X_6Y_6Z_6$);
- ротация гидродрели 360° (СО $O_7X_7Y_7Z_7$).

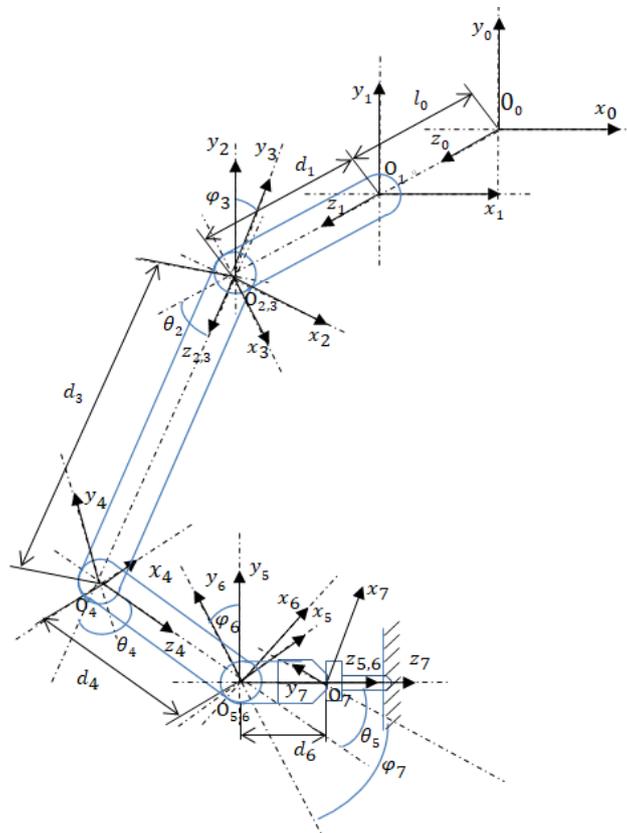


Рис. 4. Ориентация звеньев манипулятора

В целях упрощения вычислений центры систем отсчета степеней подвижности соответствующих звеньев были совмещены.

Основным недостатком манипуляторов является морально устаревшая система управления (СУ) с ручным наведением. Она не способна выполнять тонкие операции, к тому же оператор в условиях замутнения может допустить критическую ошибку. Поэтому для перспективного проекта нужно создать новую СУ манипулятора. В ней ручное управление по методу, описанному в [4],

используется лишь для начального подведения схвата к объекту управления (ОУ). Затем манипулятор в автоматическом режиме, используя распределенные по поверхности схвата оптические датчики в качестве измерителей линейного и углового положения схвата относительно ОУ (в данном случае болта), состыковывает крестовину «биты» гидродрели с пазом ОУ (рис. 5).

Для определения допустимой ориентации манипулятора в каждом из рабочих положений была решена обратная задача кинематики. Для этого был составлен скрипт для модели MATLAB Simulink, составляющий расширенную матрицу поворотов, последовательность которых показана на рис. 4. По заданным векторам \mathbf{n} , \mathbf{s} , \mathbf{a} , \mathbf{p} этот скрипт рассчитывает переменные φ_7 , φ_6 , θ_5 , θ_4 , φ_3 , θ_2 , l_0 . Согласно методам, описанным в [5], результирующая однородная матрица преобразования \mathbf{T} имеет следующий вид:

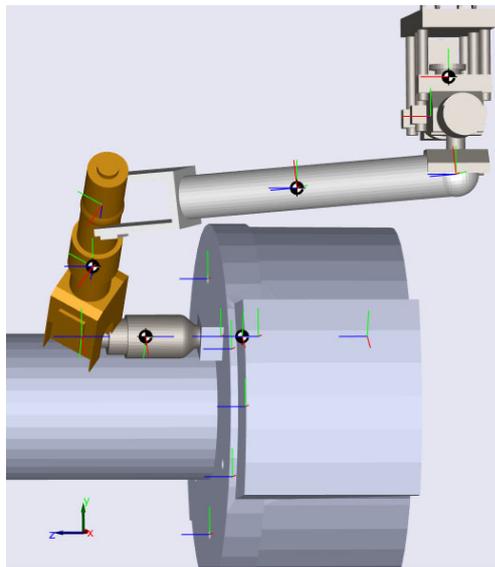


Рис. 5. Модель манипулятора в MATLAB Simulink в рабочем положении

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = T_{z_7, \varphi_7} T_{z_6, \varphi_6} T_{y_5, \theta_5} T_{y_4, \theta_4} T_{z_3, \varphi_3} T_{y_2, \theta_2} T_{l_0} =$$

$$= \begin{pmatrix} C\varphi_7 & -S\varphi_7 & 0 & 0 \\ S\varphi_7 & C\varphi_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C\varphi_6 & -S\varphi_6 & 0 & 0 \\ S\varphi_6 & C\varphi_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C\theta_5 & 0 & S\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta_5 & 0 & C\theta_5 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} C\theta_4 & 0 & S\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta_4 & 0 & C\theta_4 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C\varphi_3 & -S\varphi_3 & 0 & 0 \\ S\varphi_3 & C\varphi_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C\theta_2 & 0 & S\theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta_2 & 0 & C\theta_2 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

куда в качестве элементов матриц входят составляющие следующих векторов: $\mathbf{n} = [0 \ 0 \ 1]$ — вектор нормали к схвату; $\mathbf{s} = [1 \ 0 \ 0]$ — касательный вектор схвата (требование параллельности граней крестовины на оконечности гидродрели к пазу болта); $\mathbf{a} = [0 \ 1 \ 0]$ — вектор подхода схвата; $\mathbf{p} = [30,5583 \ 12,1461 \ -3,4141]$ — вектор положения схвата; остальные элементы $C\varphi_i$ — косинус угла поворота относитель-

но оси z_i ; $S\theta_i$ — синус угла поворота относительно оси y_i ; l_0 — поступательное перемещение первого звена по рельсам; d_i — расстояние между соседними СО.

Из всего множества допустимых значений были выбраны следующие значения переменных $\varphi_7, \varphi_6, \theta_5, \theta_4, \varphi_3, \theta_2, l_0$:

$$\begin{cases} l_0 = 31,1804 \text{ м;} \\ \theta_2 = 0,51559401 \text{ рад;} \\ \varphi_3 = 1,42806318 \text{ рад;} \\ \theta_4 = 1,939493 \text{ рад;} \\ \theta_5 = 1,34081804 \text{ рад;} \\ \varphi_6 = 1,40301018 \text{ рад;} \\ \varphi_7 = 0,51559401 \text{ рад.} \end{cases}$$

Для проверки расчетов и законов управления звеньями, сформулированных на основе [6–9], в MATLAB Simulink с пакетом SimMechanics была создана модель, включающая в себя исследуемые тела, их взаимосвязи, движущие силы и законы управления ими, физические законы и логику систем управления (рис. 6).

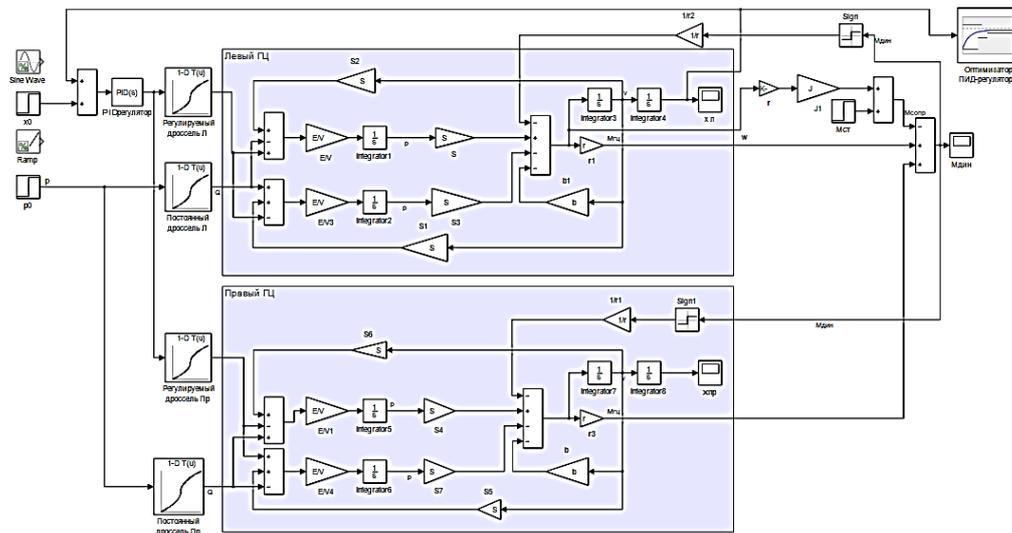


Рис. 6. Часть структурной модели, описывающая гидропривод качания кисти манипулятора

Целесообразно разделить СУ на несколько модулей, управляющих отдельными звеньями манипулятора. Функциональная схема СУ кисти манипулятора представлена на рис. 7.

Основное назначение СУ кисти — управление тремя гидравлическими приводами: качания кисти, ротации схвата, сжатия схвата. На первом этапе оператор в ручном режиме подводит схват к ОУ на фланце сменного инструмента. Команды поступают из СУ манипулятора через Интерфейс CAN на микро-

контроллер МК, с него — на электрогидравлические усилители ЭГУ, а с них — на гидродвигатели. Датчики давления ДД, положения ДП и скорости ДС обеспечивают соответствующие обратные связи. После выведения схвата манипулятора на расстояние порядка 15 см от корпуса МК посредством дальномерной системы из сканирующего лидара и матрицы оптических измерительных датчиков ИК с помощью триангуляционного метода, описанного в [10], определяет положение кисти и управляет автоматическим сближением с инструментом. Когда датчик касания сигнализирует о стыковке «биты» гидродрели с пазом на ОУ, привод ротации схвата закручивает/выкручивает болт с моментом закрутки, который измеряется силомоментным датчиком и передается в МК через аналого-цифровой преобразователь АЦП.

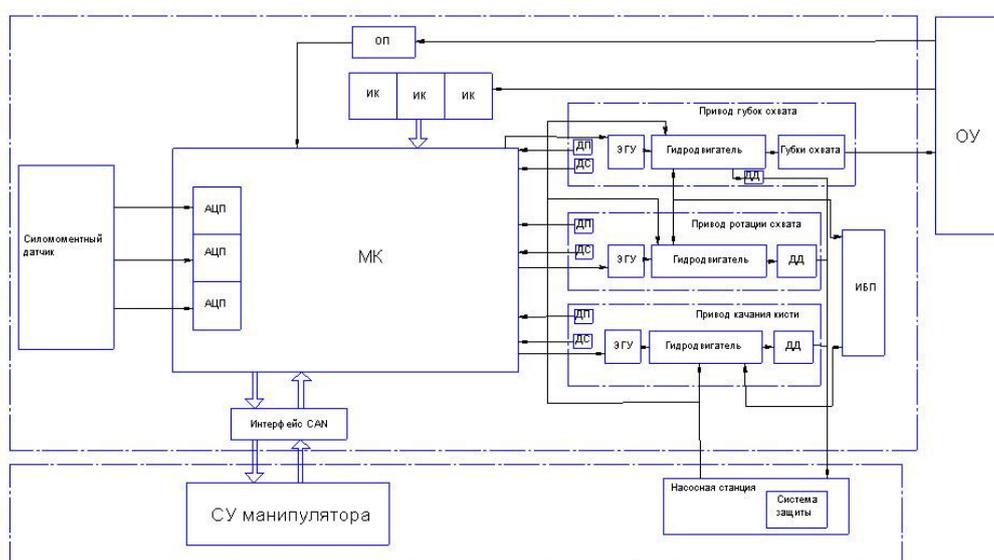


Рис. 7. Функциональная схема системы управления кисти манипулятора

Заключение. В результате исследования СУ кисти манипулятора были получены следующие результаты.

1. Скорость штока гидроцилиндра качания кисти должна быть не более $v_{шт} = 2,5$ см/с, чтобы обеспечить достаточно малую угловую скорость схвата для передачи информации с разрешением в 1 градус импульсами длиной 10 мкс с периодичностью раз в $t_{зад} = 100$ мкс.

2. Исходное расстояние от центра СО $O_7X_7Y_7Z_7$ до ОУ лежит в диапазоне 50...175 мм; угол наклона не более 15° . Они определяются техническими характеристиками оптических датчиков.

3. Минимальная частота дискретизации, гарантированно восстанавливающая аналоговые сигналы, составляет $f_{дискр} = 192$ кГц.

Использование уже существующих наработок, таких как манипуляторное устройство глубоководного аппарата, сокращает трудоемкость и время на раз-

работку комплекса, позволяет избежать ошибок при проектировании и оправдать усилия, потраченные на создание уникального аппарата, для которого не нашлось подходящих задач в свое время.

Литература

- [1] Шаповалов А.Б., Солунин В.Л., Костюков В.В. Системы наведения, управления и приводы. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [2] Lipton I., Gleeson E., Munro P. Preliminary economic assessment of the Solwara project. Nautilus Minerals Niugini Ltd, 2018.
- [3] Хуснутдинов Л.А. Методы расчёта и проектирования подводного манипулятора. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. М., МГУПИ, 2009.
- [4] Попов Е.П., Юревич Е.И., ред. Робототехника. М., Машиностроение, 1984.
- [5] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М., Мир, 1989.
- [6] Мрочек В.И. Гидравлика, пневматика и гидропневмоприводы. Могилев, Белорусско-Российский университет, 2003.
- [7] Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. М., Машиностроение, 1982.
- [8] Юшкин В.В. Основы расчета объемного гидропривода. Минск, Высшая школа, 1982.
- [9] Щемелев А.М. Проектирование гидропривода машин для земляных работ. Могилев, ММИ, 1995.
- [10] Гужов В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2015.

Григорьев Андрей Сергеевич — студент кафедры «Мехатроника и робототехника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

NEW AREAS OF APPLICATION OF THE POISK-2 BATHYSCAPH MANIPULATOR DEVICE

A.S. Grigoriev

andregrygoriev656@mail.ru
SPIN-code: 5404-0648

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article is devoted to the use of electro-hydraulic manipulator systems from the Poisk-2 unmanned underwater vehicle for a project on the extraction of polymetallic ores in deep water. Existing technologies in this area are described, their advantages and disadvantages are analyzed. The article proposes the idea for a more rational composition of the underwater vehicle, in which it would be necessary to apply modernized manipulator systems, for which they should have a combined remote-automatic control. To develop the design of the new manipulator, the inverse problem of kinematics was solved, a functional diagram of the operation of the new control system. The paper presents the description of its work and main characteristics, as well as a model of the movement of control objects, including physical bodies, executive hydraulic actuators and control laws.

Keywords

Underwater robotics, manipulator, control system, kinematics, electro-hydraulic drive, transformation matrix, model, automatic control

Received 17.05.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Shapovalov A.B., Solunin V.L., Kostyukov V.V. Sistemy navedeniya, upravleniya i privody. Moskva, Bauman MSTU Publ., 2017 (in Russ.).
- [2] Lipton I., Gleeson E., Munro P. Preliminary economic assessment of the Solwara project. Nautilus Minerals Niugini Ltd, 2018.
- [3] Khusnutdinov L.A. Metody rascheta i proektirovaniya podvodnogo manipulyatora. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Calculation and technique of underwater manipulator. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MGUPI Publ., 2009 (in Russ.).
- [4] Popov E.P., Yurevich E.I., ed. Robototekhnika [Robotics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984 (in Russ.).
- [5] Fu K.S., Gonzales R.C., Lee C.S.G. Robotics: control, sensing vision and intelligence. McGraw Hill, 1987. (Russ. ed.: Robototekhnika. Moscow, Mir Publ., 1989.)
- [6] Mrochek V.I. Gidravlika, pnevmatika i gidropnevmoprivody [Hydraulics, pneumatics and hydraulic drives]. Mogilev, Belorussko-Rossiyskiy universitet Publ., 2003 (in Russ.).
- [7] Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B., et al. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982 (in Russ.).
- [8] Yushkin V.V. Osnovy rascheta ob"emnogo gidroprivoda [Calculation fundamentals of fluid power drive]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1982 (in Russ.).
- [9] Shchemelev A.M. Proektirovanie gidroprivoda mashin dlya zemlyanykh rabot [Design of hydraulic drive of machines for earthwork]. Mogilev, MMI Publ., 1995 (in Russ.).

- [10] Guzhov V.I. Metody izmereniya 3D-profilya ob"ektov. Kontaktnye, triangulyatsionnye sistemy i metody strukturirovannogo osveshcheniya [Measurement methods for object 3D profiles. Contact triangulate systems and methods of structured lighting]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2015 (in Russ.).

Grigoriev A.S. — Student, Department of Mechatronics and Robotics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.