

М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, А. В. Романова, Г. С. Еремин

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАНИПУЛЯТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АГРЕГАТА

Аннотация. При возведении сооружений, имеющих фундаментную основу, состоящую из свай, используются сваебойные коперы. Последовательность такого технологического процесса состоит из ряда операций: 1 – подготовка площадки; 2 – транспортировка свай к месту их погружения; 3 – установка сваи в молот; 4 – забивка по размеченным точкам. Все работы требуют задействования комплекса механизированных средств, состоящих из погрузчиков и транспортных машин. Недостатком такого технологического процесса является малая автоматизация технических средств. Предлагается автоматизировать технологический процесс за счет применения автоматизированного погрузочно-транспортного агрегата с манипуляторами. Предложена конструкция агрегата. Описан технологический процесс забивки свай с погрузочно-транспортными работами. Проведен кинематический расчет исполнительного механизма манипулятора относительно заданного положения. Найдена зависимость углов поворота звеньев манипулятора и изменения скоростей штоков исполнительных приводов от времени.

Ключевые слова: автоматизированный агрегат, сваи, манипулятор, грузозахватный орган, кинематика, шасси.

Для цитирования: Анализ кинематических характеристик манипулятора автоматизированного агрегата / М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, А. В. Романова, Г. С. Еремин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 226–232. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_226.

Введение

В современное время при возведении свайного фундаментного основания широко применяются сваебойные коперы. Недостатком этого технологического процесса является малая автоматизация. Сваи необходимо доставить на строительную площадку, установить сваю в сваебойный молот, и произвести забивку. При этом используется комплекс механизированных средств, а также операторы, которые осуществляют контроль и мониторинг технологического процесса. С целью уменьшения количества ручного труда и задействованной техники предлагается использовать автоматизированный погрузочно-транспортный агрегат, на котором установлен манипулятор последовательной и параллельной структуры, снабженный универсальным трехступенным грузозахватным устройством с молотом. Предложена конструкция автоматизированного агрегата. Описан технологический процесс загрузки, транспортировки и забивки свай. Проведен кинематический расчет манипуляционного устройства. Найдена зависимость изменения исполнительных звеньев и изменения скоростей штоков исполнительных приводов манипулятора от времени [1, 2].

Цель исследования заключается в представлении конструкции агрегата для автоматизированной забивки свай, который заменит комплекс машин, а также описании кинематических характеристик исполнительного механизма манипулятора относительно заданного положения.

Основная часть

При возведении сооружений, имеющих фундаментную основу, состоящую из свай, используются сваебойные коперы. Последовательность технологического процесса состоит из ряда операций: 1 – подготовка площадки; 2 – транспортировка свай к месту их погружения; 3 – установка сваи в молот; 4 – забивка по размеченным точкам. Все работы требуют задействования комплекса механизированных средств, состоящих из погрузчиков и транспортных машин.

Предлагается использовать конструкцию агрегата, который заменит комплекс машин и автоматизирует процесс забивки свай. Автоматизированное техническое средство (рис. 1) состоит из двухосного гусеничного шасси 1; кузова 2 для транспортировки груза; кабины 3 на поворотном основании 4; манипуляторов последовательной и параллельной структуры, состоящих из звеньев 5, 6, 7; шарниров 8, 9, 10, 11, 12, 13, являющихся кинематическими парами пятого класса; исполнительных приводов 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20; трехступенного грузозахватного устройства 21, состоящего из тяг 22, привода 23; сваебойного молота 24; блока управления 25; датчика контроля положения свай 26; опорных устройств 27 [3, 4, 5].

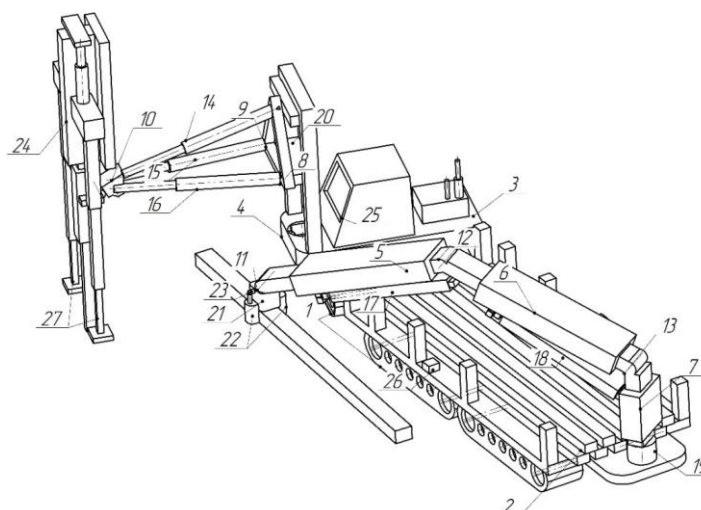


Рис. 1. Общий вид автоматизированного агрегата:

1 – шасси; 2 – кузова; 3 – кабины; 4 – поворотное основание; 5, 6, 7 – звенья;
8, 9, 10, 11, 12, 13 – шарниры; 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 – исполнительные приводы;
21 – трехступенное грузозахватное устройство; 22 – тяги; 23 – привод; 24 – свабойный молот;
25 – блок управления; 26 – датчик контроля положения свай; 27 – опорные устройства

С блока управления подается запрограммированный сигнал на исполнительные приводы 17, 18, 19 и в автоматическом режиме манипулятором последовательной структуры, установленным на раме кузова, с помощью звеньев 5, 6, 7 свая позиционируется и устанавливается в копер трёхступенным грузозахватным устройством (рис. 2).

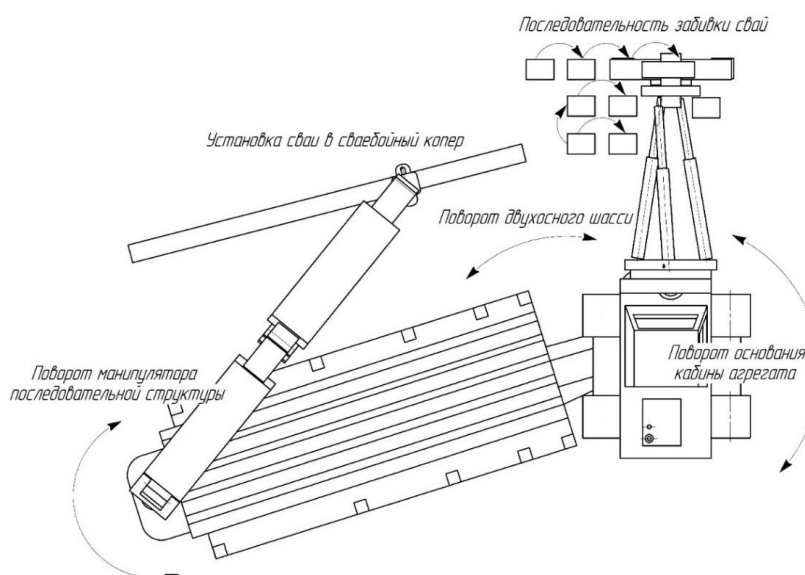


Рис. 2. Схема технологического процесса транспортировки и забивки свай

Далее так же в автоматическом режиме с помощью поворотного основания 4, манипуляционного механизма параллельной структуры и исполнительных приводов 14, 15, 16 копровая установка перемещается к месту забивки и осуществляется погружение сваи по заданным координатам.

Весь цикл технологического процесса повторяется до момента сигнала с датчика контроля 26 положения свай, что в кузове закончился груз [6, 7].

Для данного агрегата одним из ключевых узлов является манипулятор-трипод, который обеспечивает необходимую жесткость конструкции, при высоких нагрузках от забивки свай. Рассмотрим исполнительный механизм манипулятора относительно заданного положения, построенный по уравнениям кинематики (рис. 3).

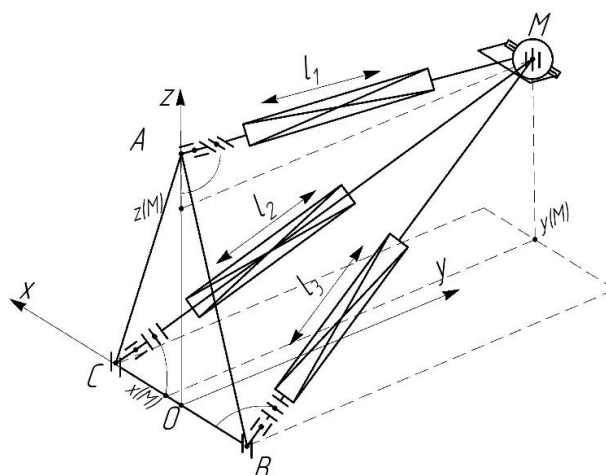


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора параллельной структуры

Принимаем, что для управляемых исполнительных механизмов найдены соотношения (прямая задача кинематики):

$$x(t) = F_1(q_s), y(t) = F_2(q_s), z(t) = F_3(q_s), \quad (1)$$

где $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – координаты пространственного положения контролируемой точки манипулятора.

Задача формулируется следующим образом: в начальный момент времени при $t = 0$ положение контролируемой точки характеризуется значениями x_0 , y_0 , z_0 . Координаты в назначенной точке x_k , y_k , z_k . При $t = 0$ имеют место отклонения.

$$\Delta x = x_k - x_0, \quad \Delta y = y_k - y_0, \quad \Delta z = z_k - z_0. \quad (2)$$

Требуется построить законы задающих воздействий $q_s(t)$ приводных двигателей, при которых перемещение характерной точки манипулятора в назначенную точку x_k , y_k , z_k осуществляется таким образом, что отклонения координат $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$, $\Delta z(t)$ в процессе перемещения изменяются в соответствии с решением дифференциальных уравнений [8].

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{x}(t) + k_{11} \Delta \dot{x}(t) + k_{21} \Delta x(t) &= 0, \quad \Delta \ddot{y}(t) + k_{11} \Delta \dot{y}(t) + k_{21} \Delta y(t) = 0, \\ \Delta \ddot{z}(t) + k_{11} \Delta \dot{z}(t) + k_{21} \Delta z(t) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где k_{ij} – коэффициенты, описывающие малые отклонения, и их скорости связаны между разными степенями свободы, i – номер уравнения (выходной степени свободы), j – номер переменной (входной степени свободы).

Закон изменения координат манипулятора является программным. Чтобы построить закон управления с обратными связями, необходимо вычислять выражения по текущим значениям обобщенных координат [9].

Из выражения (1) связываем декартовы координаты с обобщенными и получаем выражения проекций на $x(M)$, $y(M)$, $z(M)$:

$$\begin{cases} x(M) = \frac{CB^2 + l_1^2 - l_3^2}{2CB}, \\ y(M) = l_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{CB^2 + l_1^2 - l_3^2}{2CB} \right)^2}, \\ z(M) = \frac{OB \cdot (l_2^2 - l_1^2)}{AO^2}, \end{cases} \quad (4)$$

где CB , OB , AO – размеры треугольной фермы относительно начала координат $OXYZ$; l_1 , l_2 , l_3 – длины исполнительных приводов, являющиеся обобщенными координатами q_i .

Дифференцируем выражения (4) по следующим формулам:

$$\begin{cases} \dot{x}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_1}{\partial q_s} \dot{q}_s, \\ \dot{y}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_2}{\partial q_s} \dot{q}_s, \\ \dot{z}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_3}{\partial q_s} \dot{q}_s. \end{cases} \quad (5)$$

Получаем выражения проекций скоростей

$$\begin{cases} \dot{x}_M(t) = -\frac{(\dot{l}_3 \cdot l_3) + \dot{l}_1 \cdot l_1}{CB}, \\ \dot{y}_M(t) = \frac{(\dot{l}_3 + l_3 + \dot{l}_1 \cdot l_1) \cdot CB^2 + (\dot{l}_1 \cdot l_1 \cdot l_3^2 - l_3 \cdot l_3^3 + \dot{l}_1 \cdot l_1^3)}{l_1 \cdot CB^2 \cdot \sqrt{-\frac{CB^4 - 2 \cdot l_3^2 \cdot CB^2 + l_3^4 - 2 \cdot l_1^2 \cdot l_3^2 + l_1^4}{l_1^2 \cdot CB^2}} + 2}, \\ \dot{z}_M(t) = \frac{CB^2 + (2 \cdot \dot{l}_1 \cdot l_1 - 2 \cdot \dot{l}_3 \cdot l_3)}{2 \cdot CB}. \end{cases} \quad (6)$$

Дифференцируем выражения (6) по следующим формулам

$$\begin{cases} \ddot{x}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_1}{\partial q_s} \ddot{q}_s + \sum_{s=1}^n \sum_{n=i}^n \frac{\partial^2 F_1}{\partial q_s \partial q_i} \dot{q}_s \dot{q}_i, \\ \ddot{y}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_2}{\partial q_s} \ddot{q}_s + \sum_{s=1}^n \sum_{n=i}^n \frac{\partial^2 F_2}{\partial q_s \partial q_i} \dot{q}_s \dot{q}_i, \\ \ddot{z}_M(t) = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F_3}{\partial q_s} \ddot{q}_s + \sum_{s=1}^n \sum_{n=i}^n \frac{\partial^2 F_3}{\partial q_s \partial q_i} \dot{q}_s \dot{q}_i. \end{cases} \quad (7)$$

Получаем выражения проекций ускорений

$$\begin{cases} \ddot{x}_M(t) = \frac{(\dot{l}_3 - \ddot{l}_3) \cdot l_3 + (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1}{CB}, \\ \ddot{y}_M(t) = \frac{((\dot{l}_3 + \ddot{l}_3) \cdot l_3 + (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1) \cdot CB^2 + ((\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1 \cdot l_3^2 - (\dot{l}_3 + \ddot{l}_3) \cdot l_3^3 + (\dot{l}_3 + \ddot{l}_3) \cdot l_1^2 \cdot l_3 - (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1^3)}{l_1 \cdot CB^2 \cdot \sqrt{-\frac{CB^4 - 2 \cdot l_3^2 \cdot CB^2 + l_3^4 - 2 \cdot l_1^2 \cdot l_3^2 + l_1^4}{l_1^2 \cdot CB^2}} + 2}, \\ \ddot{z}_M(t) = \frac{2 \cdot OB \cdot ((\dot{l}_2 + \ddot{l}_2) \cdot l_2 - (\dot{l}_1 + \ddot{l}_1) \cdot l_1)}{OA^2}. \end{cases} \quad (8)$$

Принимаем начальные значения точки M грузозахватного устройства с координатами $x_{M0} = 1305$ мм, $y_{M0} = 3035$ мм, $z_{M0} = 1350$ мм, перемещаем в точку с координатами $x_M = 1653$ мм, $y_M = 4875$ мм, $z_M = 457$ мм, с периодом $\tau = 16$ с, по законам изменения обобщенных координат.

$$\begin{cases} l_1(t) = l_{10} - \Delta l_{10} (3\tau^{-t} - 3\tau^{-2t} + \tau^{-3t}), \\ l_2(t) = l_{20} - \Delta l_{20} (3\tau^{-t} - 3\tau^{-2t} + \tau^{-3t}), \\ l_3(t) = l_{30} - \Delta l_{30} (3\tau^{-t} - 3\tau^{-2t} + \tau^{-3t}). \end{cases} \quad (9)$$

Получаем изменения $\Delta l_{10} = 1873$ мм, $\Delta l_{20} = 454$ мм, $\Delta l_{30} = 1229$ мм, а также зависимости изменения исполнительных звеньев от времени (рис. 4) [10].

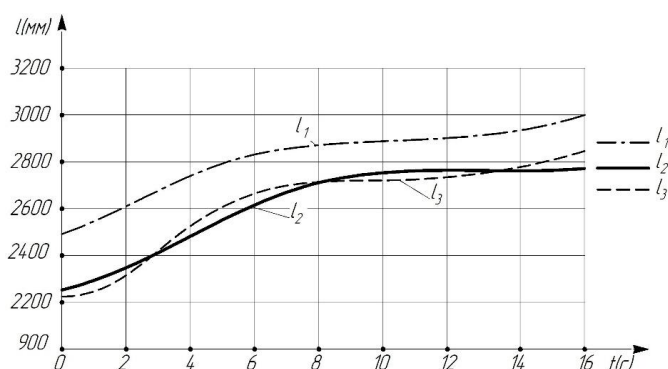


Рис. 4. Графическая зависимость изменения исполнительных звеньев от времени

Зависимость изменения скоростей исполнительных приводов представлена на рис. 5.

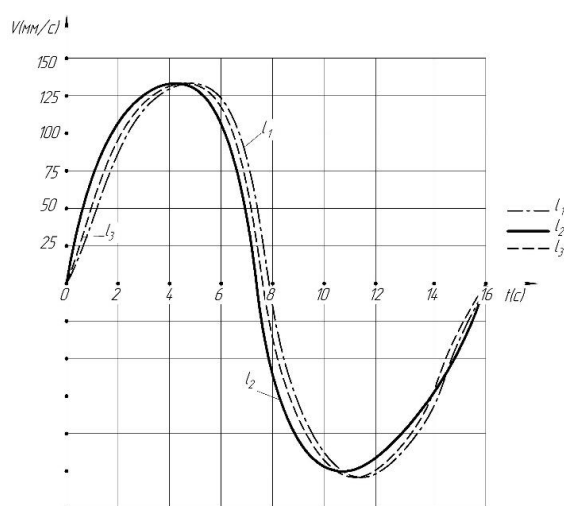


Рис. 5. Графическая зависимость изменения скоростей штоков исполнительных приводов

Выводы

В ходе исследований разработана конструкция погрузочно-транспортного механизма, позволяющего заменить комплекс машин и оборудования. Предложен технологический процесс забивки свай. Проведен кинематический анализ механизма с определением скоростей и ускорений исполнительных звеньев. Проведен кинематический расчёт исполнительного механизма манипулятора относительно заданного положения. Найдена зависимость изменения исполнительных звеньев и изменения скоростей штоков исполнительных приводов манипулятора от времени. Анализ которых показал, что на протяжении обоих графиков, с течением времени точка попадает в конечную область целевой точки с заданной точностью. При принятых значениях параметров системы управления отклонения от заданного положения не превышают 4 %.

Список литературы

- 1 Гусев, О. В. Решение прямой задачи кинематики для шестизвенового робота-манипулятора / О. В. Гусев // Вестник кибернетики. – 2024. – № 2. – С. 39–48. – DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5.
- 2 Белов, М. И. Теория механизмов и машин : учебное пособие / М. И. Белов, С. В. Сорокин. – 2-е изд. – Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2020. – 322 с. – ISBN 978-5-9675-0567-1.

References

- 1 Gusev, O. V. The solution of a direct kinematics problem for a six-arm robot manipulator / O. V. Gusev // Bulletin of Cybernetics. – 2024. – No. 2. – P. 39–48. – DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-5.
- 2 Belov, M. I. Theory of mechanisms and machines : a tutorial / M. I. Belov, S. V. Sorokin. – 2nd ed. – Moscow : RIOR : INFRA-M, 2020. – 322 p. – ISBN 978-5-9675-0567-1.

3 Кинематический и динамический анализ плоских рычажных механизмов : учебное пособие / А. А. Туvin [и др.]. – Иваново : ИВГПУ, 2017. – 112 с.

4 **Николаев, М. Е.** Обоснование параметров клещевого захвата погрузочно-транспортного агрегата / М. Е. Николаев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса : Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 1 (61). – С. 431–441. – DOI 10.32786/2071-9485-2021-01-41.

5 **Жадановский, Б. В.** Организация строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных работ в строительстве автомобильными кранами / Б. В. Жадановский, С. А. Синенко, И. М. Мирошникова // Системные технологии. – 2018. – № 2 (27). – С. 41–48. – ISSN 2227-5398.

6 **Николаев, М. Е.** Погрузочно-транспортный агрегат с увеличенной рабочей зоной / М. Е. Николаев, Е. Ю. Козловцева, А. В. Калачев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.

7 **Русских, С. В.** Динамика плоского движения космического крана-манипулятора типа руки с учетом изгиба звеньев / С. В. Русских, Ф. Н. Шклярчук // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 5. – С. 112–122. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-5-112-122.

8 Исследование кинематики привода мехатронного устройства на базе пространственного механизма / Ф. Ф. Хабибуллин, Р. Т. Исламов, Т. А. Мустафаев, В. Н. Крымова // Омский научный вестник. – 2022. – № 3. – С. 48–52. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-183-48-52.

9 **Ту, Р.** Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора / Р. Ту // Прикладная математика и Физика. – 2023. – № 1. – С. 70–83. – DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-1-70-83.

10 Justification Parameters and Planning Capture Trajectories for Robotic Loading and Transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – P. 245. – DOI 10.1007/978-981-16-3349-2_20.

3 Kinematic and dynamic analysis of flat lever mechanisms : a tutorial / A. A. Tuvin [at al]. – Ivanovo : IVGPU, 2017. – 112 p.

4 **Nikolaev, M. E.** Substantiation of the parameters of the pincer grip of the loading and transport unit / M. E. Nikolaev // Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex : Science and higher professional education. – 2021. – No. 1 (61). – P. 431–441. – DOI 10.32786/2071-9485-2021-01-41.

5 **Zhadanovsky, B. V.** Organization of construction and assembly and loading and unloading operations in construction by truck cranes / B. V. Zhadanovsky, S. A. Sinenko, I. M. Miroshnikova // System technologies. – 2018. – No. 2 (27). – P. 41–48. – ISSN 2227-5398.

6 **Nikolaev, M. E.** Loading and transport unit with an enlarged working area / M. E. Nikolaev, E. Y. Kozlovtsseva, A. V. Kalachev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.

7 **Russkikh, S. V.** Dynamics of the flat motion of a hand-type space crane manipulator taking into account the bending of the links / S. V. Russkikh, F. N. Shklyarchuk // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical engineering. – 2023. – No. 5. – P. 112–122. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-5-112-122.

8 Investigation of the kinematics of the drive of a mechatronic device based on a spatial mechanism / F. F. Khabibullin, R. T. Islamov, T. A. Mustafaev, V. N. Krymova // Omsk Scientific Bulletin. – 2022. – No. 3. – P. 48–52. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-183-48-52.

9 **Tu, R.** Development of a software module for modeling kinematics and dynamics of a manipulator / R. Tu // Applied Mathematics and Physics. – 2023. – No. 1. – P. 70–83. – DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-1-70-83.

10 Justification Parameters and Planning Capture Trajectories for Robotic Loading and Transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – P. 245. – DOI 10.1007/978-981-16-3349-2_20.

M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, A. V. Romanova, G. S. Eremin

ANALYSIS OF THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE AUTOMATED UNIT'S MANIPULATOR

Abstract. When constructing structures with a foundation consisting of piles, pile drivers are used. This process consists of several steps: 1– preparing the site; 2 – transporting the piles to their placement location; 3 – installing the pile in the hammer; 4 – driving the piles at designated points. These tasks require the use of a range of mechanized equipment, including

loaders and transport vehicles. A disadvantage of this process is the limited automation of the equipment. It is proposed to automate the technological process by using an automated loading and transport unit with manipulators. The design of the unit is proposed. The technological process of pile driving with loading and transport operations is described. The kinematic calculation of the manipulator's executive mechanism is performed relative to the specified position. The dependence of rotation angles of the manipulator's links and the changes in the speeds of the executive drive rods is found.

Keywords: automated unit, piles, manipulator, load-handling device, kinematics, chassis.

For citation: Analysis of the kinematic characteristics of the automated unit's manipulator / M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, A. V. Romanova, G. S. Eremin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 226–232. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_226.

Сведения об авторах

Николаев Максим Евгеньевич

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Перфилов Владимир Александрович

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного
технического университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

Романова Анастасия Владимировна

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного
технического университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
магистрант,
e-mail: anastasiaromanova6802@mail.ru

Еремин Георгий Сергеевич

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного
технического университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
магистрант,
e-mail: zorik042001@mail.ru

Information about the authors

Nikolaev Maxim Evgenievich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Perfilov Vladimir Aleksandrovich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

Romanova Anastasia Vladimirovna

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Master's Student,
e-mail: anastasiaromanova6802@mail.ru

Eremin Georgy Sergeevich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IA&C VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Master's Student,
e-mail: zorik042001@mail.ru