

УДК 621.873

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ МАНІПУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БУДІВЕЛЬНОГО РОБОТА

Д.О. Міщук, доц., к.т.н., Київський національний університет
будівництва і архітектури

Анотація. З метою подальшої розробки системи керування будівельного робота встановлено залежності між узагальненими координатами його маніпуляційної системи та координатами положення робочого органа, яким виконується переміщення вантажу. Досліджено кінематику маніпуляційної системи будівельного робота.

Ключові слова: маніпуляційна система, будівельний робот, кінематика руху.

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОГО РОБОТА

Д.А. Мищук, доц., к.т.н., Киевский национальный университет
строительства и архитектуры

Аннотация. С целью дальнейшей разработки системы управления строительного робота установлены зависимости между обобщенными координатами его манипуляционной системы и координатами положения рабочего органа, которым выполняется перемещение груза. Исследована кинематика манипуляционной системы строительного робота.

Ключевые слова: манипуляционная система, строительный робот, кинематика движения.

KINEMATIC ANALYSIS OF MANIPULATION SYSTEMS OF CONSTRUCTION ROBOTS

D. Mischuk, Assoc. Prof., Cand., Eng. Sc.,
Kyiv National University of Construction and Architecture

Abstract. In order to further develop construction-robot control systems, dependencies between generalized coordinates of its manipulation system and the position coordinates of the working tool for carrying loads have been ascertained. Construction-robot manipulation system kinematics has been explored.

Key words: manipulation system, construction robot, kinematics of motion.

Вступ

В умовах розвитку енергоємного та конкурентноспроможного будівництва виникла необхідність створення будівельних роботів [1]. Розробка конструкції будівельного робота для сучасних потреб будівництва є актуальною задачею. Важливим напрямом дослідження в будівельній робототехніці є розробка маніпуляційної системи будівельного робота та системи його керування.

Аналіз публікацій

Відомі дослідження [2], присвячені побудові системи керування маніпуляційною системою на основі оптимізації режимів руху привідних ланок шляхом мінімізації середніх значень енерговитрат та динамічних показників маніпуляційної системи. Проте в таких дослідженнях не розглядаються задачі позиціонування маніпуляційної системи та встановлення залежностей зміни узагальнених

координат від характеру переміщення вантажу (вантажозахоплювального пристрою). Для встановлення подібних залежностей необхідно розв'язати ряд задач, пов'язаних із геометричними властивостями маніпуляційних систем. Задачі кінематичного дослідження маніпуляторів будівельних роботів є важливими та необхідними при подальшій побудові систем їхнього керування й вивчення геометричних характеристик.

У роботах Кобринського А.А. та Кобринського А. Е. [3] запропоновано ряд підходів для дослідження кінематики маніпуляційної системи робота, проте результати цих досліджень є складними для практичного застосування.

У ряді робіт [4, 5] розглянуто методи розв'язку прямих геометричних задач позиціонування маніпуляційної системи, проте зворотну геометричну задачу в таких дослідженнях повністю не розкрито.

Мета і постановка задачі

Метою даної статті є встановлення характеру зміни узагальнених координат маніпулятора будівельного робота залежно від положення вантажу та дослідження кінематики маніпуляційної системи будівельного робота.

Кінематичний аналіз

Розглянуто маніпуляційну систему будівельного робота, що складається з підйомної стріли 1, поворотної стріли 2 та висувної стріли 3. Досліджується зміна вильоту даної маніпуляційної системи у вертикальній площині. Така система має три ступені рухомості у вертикальній площині – дві кутові (α, β) та одну лінійну (q_3).

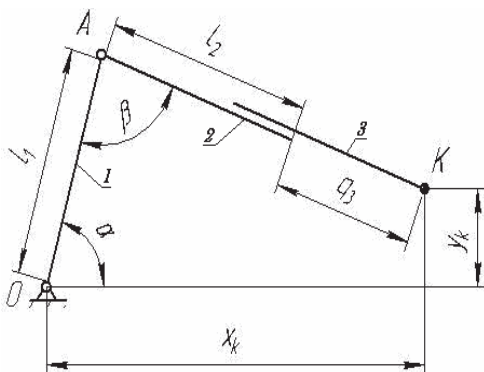


Рис. 1. Кінематична схема маніпуляційної системи будівельного робота

Визначено аналітичні залежності геометричного положення точки підвісу вантажозахоплювального пристрою маніпулятора

$$x_k = l_1 \cos(\alpha) - l_2 \cos(\alpha + \beta) - q_3 \cos(\alpha + \beta); \quad (1)$$

$$y_k = l_1 \sin(\alpha) - l_2 \sin(\alpha + \beta) - q_3 \sin(\alpha + \beta), \quad (2)$$

де l_1, l_2 – відповідно довжини підйомної та поворотної стріл.

Враховуючи залежності (1) та (2), відмітимо, що на координати положення точки підвісу вантажозахоплювального пристрою маніпулятора накладено обмеження. Побудуємо границю робочого простору маніпулятора для виявлення подібних обмежень. Для аналітичного визначення граничного значення узагальнених координат використано залежність [3]

$$\frac{\partial x_k}{\partial \alpha} \frac{\partial y_k}{\partial \beta} - \frac{\partial x_k}{\partial \beta} \frac{\partial y_k}{\partial \alpha} = 0. \quad (3)$$

З отриманого виразу випливає, що координата α може набувати будь-якого значення, а координата β на границі робочого простору набуває значення $\beta = 0 + \pi n$, де n – будь-яке ціле число.

Обмежуючи координати α та β граничними значеннями $0 < \alpha < \alpha_{\max}$, $0 < \beta < \pi$ та взявши $q_3 = 0$, побудовано робочі зони досліджуваної маніпуляційної системи для вертикальної площини зміни вильоту (рис. 2).

Наведені робочі зони обмежуються границями у вигляді дуг із радіусами

$$r_1 = l_1 + l_2, \quad r_2 = l_2,$$

$$r_3 = l_2, \quad r_4 = |l_1 - l_2|.$$

Зіставляючи наведені робочі зони маніпулятора на одній системі координат, відмітимо, що за умови, коли $l_1 > l_2$, звужується межа робочої зони порівняно з випадком, коли $l_1 \leq l_2$ та розширюється площа робочої зони вантажозахоплювального пристрою маніпулятора в першій чверті системи координат (рис. 3).

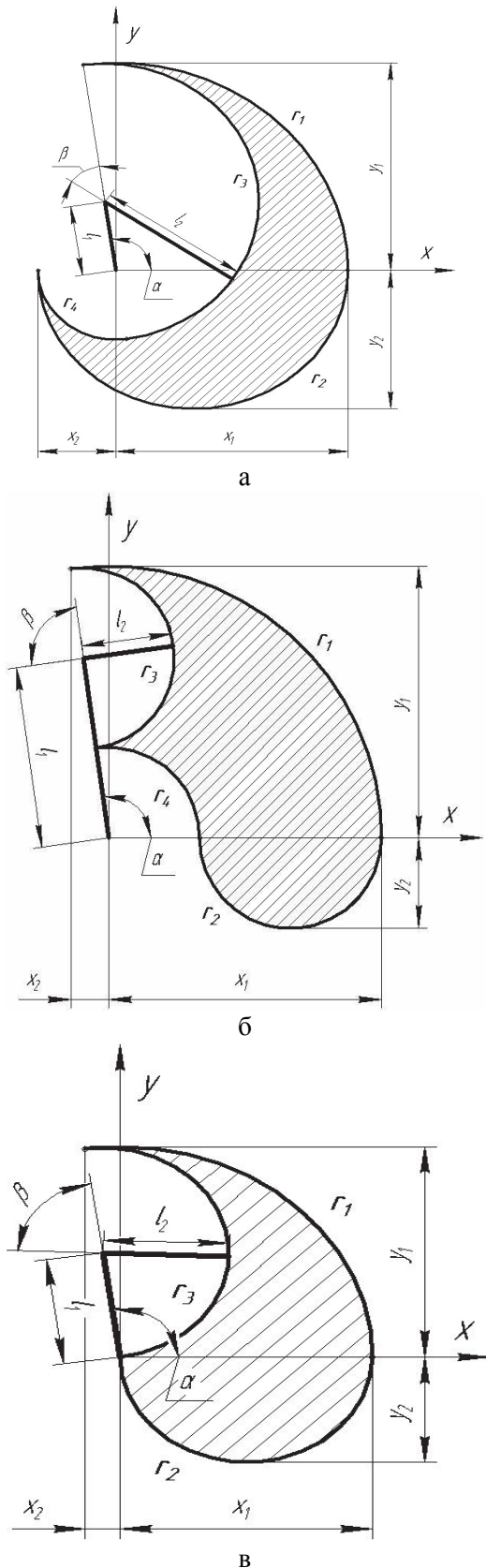


Рис. 2. Графічне подання робочих зон маніпулятора з двома рухомими ланками у вертикальній площині: а – робоча зона маніпулятора при $l_1 < l_2$; б – робоча зона маніпулятора при $l_1 > l_2$; в – робоча зона маніпулятора при $l_1 = l_2$

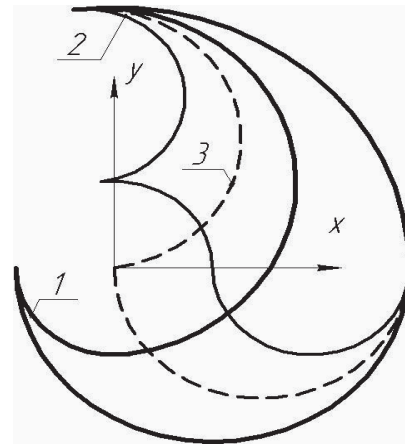


Рис. 3. Зіставлення робочих зон маніпулятора: 1 – при $l_1 < l_2$; 2 – при $l_1 > l_2$; 3 – при $l_1 = l_2$

Межі робочої зони маніпуляційної системи будівельного робота визначатимуться такими залежностями

$$\begin{cases} x_k^2 + y_k^2 \leq r_1^2; \\ (x_k - l_1 \cos(\alpha_{\min}))^2 + (y_k - l_1 \sin(\alpha_{\min}))^2 \leq r_2^2; \\ (x_k - l_1 \cos(\alpha_{\max}))^2 + (y_k - l_1 \sin(\alpha_{\max}))^2 \geq r_3^2; \\ x_k^2 + y_k^2 \geq r_4^2, \end{cases} \quad (4)$$

де α_{\min} та α_{\max} – граничні значення кута α .

Взявши, що $q_3 = \text{const}$, тоді

$$\alpha = \pm \arccos\left(\frac{1}{2l_1^2(4x_k^2 + 4y_k^2)}(-11x_k(-4l_1^2 + 4l_2^2 + 8l_2q_3 + 4q_3^2 - 4x_k^2 - 4y_k^2) \pm (l_1^2x_k^2 \times (-4l_1^2 + 4l_2^2 + 8l_2q_3 + 4q_3^2 - 4x_k^2 - 4y_k^2)^2 - 4l_1^2(4x_k^2 + 4y_k^2)(l_1^4 - 2l_1^2l_2^2 + l_2^4 - 4l_1^2l_2q_3 + 4l_2^3q_3 - 2l_1^2q_3^2 + 6l_2^2q_3^2 + 4l_2q_3^2 + q_3^4 + 2l_1^2x_k^2 - 2l_2^2x_k^2 - 4l_2q_3x_k^2 - 2q_3^2x_k^2 + x_k^4 - 2l_1^2y_k^2 - 2l_2^2y_k^2 - 4l_2q_3y_k^2 - 2q_3^2y_k^2 + 2x_k^2y_k^2 + y_k^4))^{1/2})\right); \quad (5)$$

$$\beta = \pm \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 + 2l_2q_3 + q_3^2 - x_k^2 - y_k^2}{2l_1(l_2 + q_3)}\right). \quad (6)$$

Розглянуто лінійне переміщення вантажозахоплювального пристрою маніпулятора, де залежність між координатами положення вантажу визначається

$$y_k = (x_k - x_{kn}) \frac{y_{kk} - y_{kn}}{x_{kk} - x_{kn}} + y_{kn}, \quad (7)$$

де $x_{kn}, y_{kn}, x_{kk}, y_{kk}$ – координати початкового та кінцевого положень вантажозахоплювального пристрою маніпулятора.

Досліджено геометрію маніпуляційної системи з параметрами $l_1 = 2$ м, $l_2 = 1$ м, $q_3 = 0$ м та встановлено характер зміни узагальнених координат

$$\alpha = \arccos((3x_k^3 + x_k^3 + x_k y_k^2 - (-9y_k^2 + 10x_k^2 y_k^2 - x_k^4 y_k^2 + 10y_k^4 - 2x_k^2 y_k^4 - y_k^6)^{\frac{1}{2}}) / (4(x_k^2 + y_k^2))); \quad (8)$$

$$\beta = \arccos(\frac{1}{4}(5 - x_k^2 - y_k^2)). \quad (9)$$

Підставляючи вираз (7) у залежності (8) та (9), визначено характер зміни координат α та β . На рис. 4 наведено графіки зміни узагальнених кутових координат при прямолінійному переміщенні вантажозахоплювального пристрою маніпулятора з положення $x_{kn} = 1,1$ м, $y_{kn} = 0$ м, $x_{kk} = 2$ м, $y_{kk} = 1$ м.

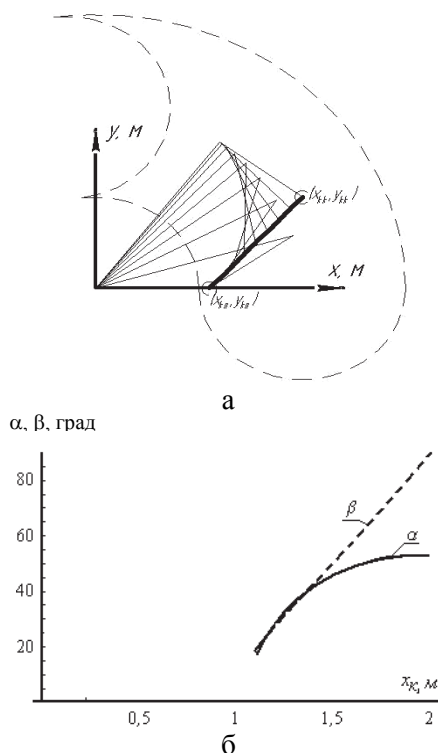


Рис. 4. Характер зміни геометрії маніпулятора за прямолінійного переміщення вантажу в межах його робочої зони: а – характер зміни геометричної конфігурації маніпулятора; б – графіки зміни узагальнених координат

Розглянуто режим переміщення вантажу маніпуляційною системою при розгоні та гальмуванні з постійним прискоренням. Кінематика вантажу в такому випадку описуватиметься такими залежностями

$$v_k = \begin{cases} v_0 + \frac{(t-t_0)(v_{max} - v_0)}{t_{\pi}}, & t_0 < t < t_1; \\ v_{max}, & t_1 < t < t_2; \\ v_{max} + \frac{(t-t_2)(v_0 - v_{max})}{t_{\Gamma}}, & t_2 < t < t_3, \end{cases} \quad (10)$$

де v_k – швидкість вантажу; v_0 – початкова та кінцева швидкості вантажу (візьмемо $v_0 = 0$); v_{max} – максимальна швидкість вантажу; $t_{\pi} = t_1 - t_0$ – проміжок часу пуску; $t_{\Gamma} = t_3 - t_2$ – проміжок часу гальмування.

Графічне подання даного режиму руху зображено на рис. 5.

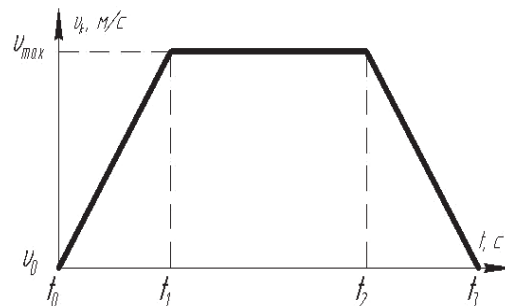


Рис. 5. Графік зміни швидкості вантажу

Продиференціювавши вираз (7) за часом, отримано

$$\frac{dy_k}{dt} = \dot{y}_k = \frac{dx_k}{dt} \left(\frac{y_{kk} - y_{kn}}{x_{kk} - x_{kn}} \right). \quad (11)$$

Виходячи з умови, що $v_k = \sqrt{\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2}$, маємо

$$\frac{dx_k}{dt} = \dot{x}_k = \sqrt{\frac{v_k^2}{1 + \left(\frac{y_{kk} - y_{kn}}{x_{kk} - x_{kn}} \right)^2}}. \quad (12)$$

Якщо у вираз (12) замість v_k підставити залежності (10), а отриманий результат проінтегрувати, то за взятих початкових та кінцевих граничних умов отримано функції, що відображають зміну координат переміщення вантажу залежно від часу руху

$$x_k = \frac{1}{2}t \sqrt{\frac{t^2 v_{\max}^2}{t_n^2 (1 + (\frac{\Delta y_k}{\Delta x_k})^2)}} + x_{kn}, \quad (13)$$

$$x_k = (t - \frac{t_n}{2}) \sqrt{\frac{v_{\max}^2}{(1 + (\frac{\Delta y_k}{\Delta x_k})^2)}} + x_{kn}, \quad (14)$$

$$x_k = \frac{t_2^2 - t_2 t_n + t_3 t_n}{2(t_2 - t_3)} \sqrt{\frac{v_{\max}^2}{(1 + (\frac{\Delta y_k}{\Delta x_k})^2)}} + \frac{t(t - 2t_3)}{2(t - t_3)} \sqrt{\frac{(t - t_3)^2 v_{\max}^2}{(t_2 - t_3)^2 (1 + (\frac{\Delta y_k}{\Delta x_k})^2)}} + x_{kk}, \quad (15)$$

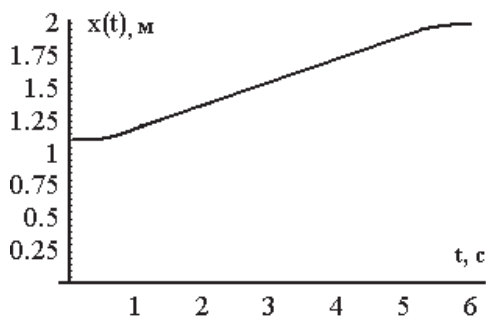
де $\Delta y_k = y_{kk} - y_{kn}$, $\Delta x_k = x_{kk} - x_{kn}$.

Максимальна швидкість переміщення робочого органа маніпулятора (вантажозахоплювального пристрою) буде

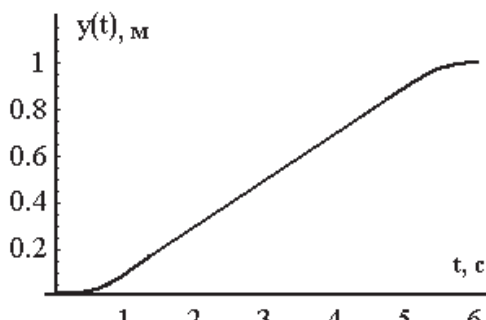
$$v_{\max} = \frac{2S}{t_3 - t_1 + t_2}, \quad (16)$$

де $S = \sqrt{(x_{kk} - x_{kn})^2 + (y_{kk} - y_{kn})^2}$ – величина переміщення вантажу.

Використовуючи вирази (7), (12)–(15), побудовано графічні залежності зміни положення координат і швидкості вантажу залежно від часу переміщення (рис. 6 та 7). За отриманими залежностями (8) та (9) досліджено кінематику руху маніпулятора, зокрема визначено швидкості зміни узагальнених координат α та β (рис. 8–10). При дослідженнях було взято час на пуск та гальмування $t_{\text{п}} = t_{\text{г}} = 1$ с, а час повного вибігу $t_3 = 6$ с.

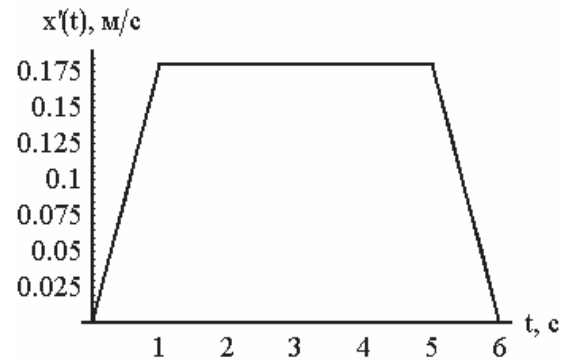


а

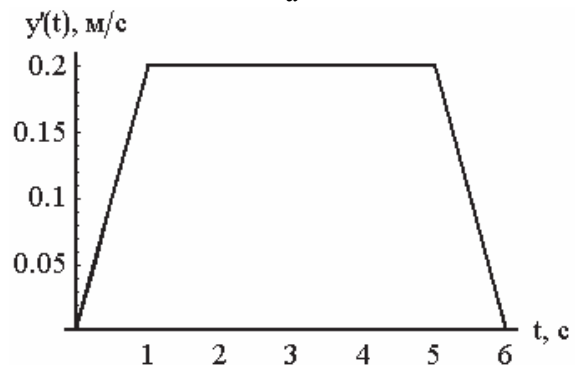


б

Рис. 6. Графіки зміни координат вантажу залежно від зміни часу при повному вибігу маніпуляційної системи

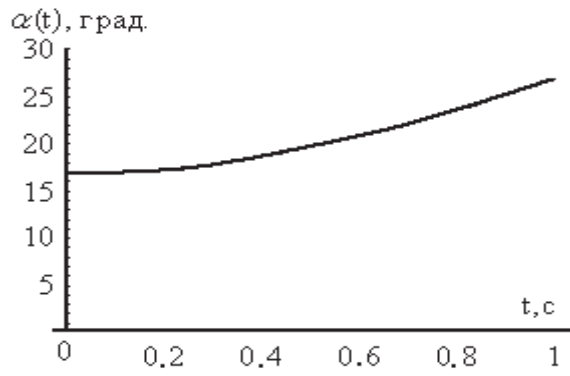


а

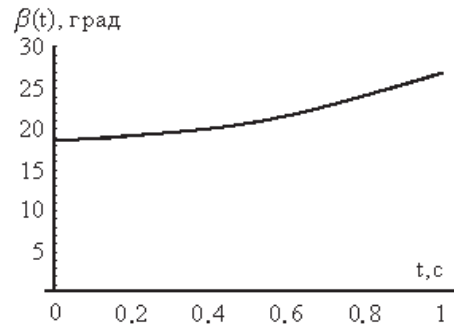


б

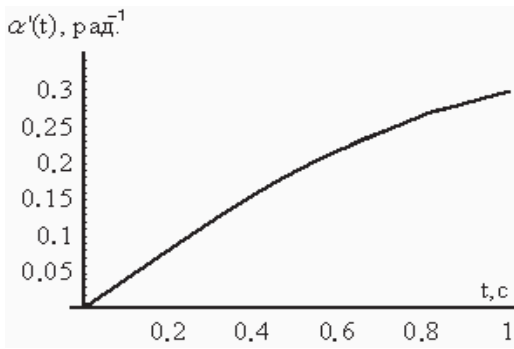
Рис. 7. Графіки зміни швидкості вантажу при повному вибігу маніпуляційної системи



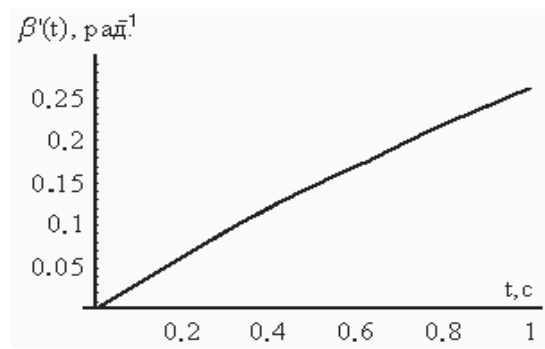
а



б

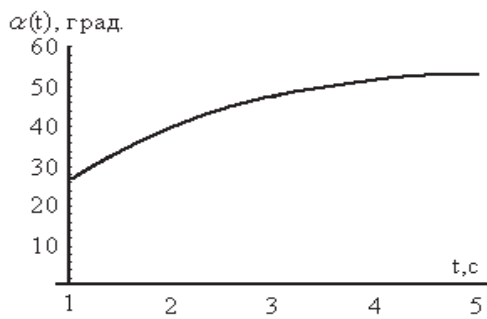


в

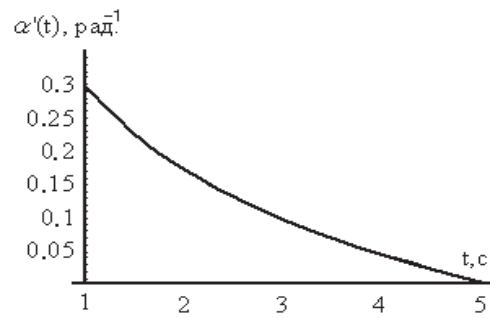


г

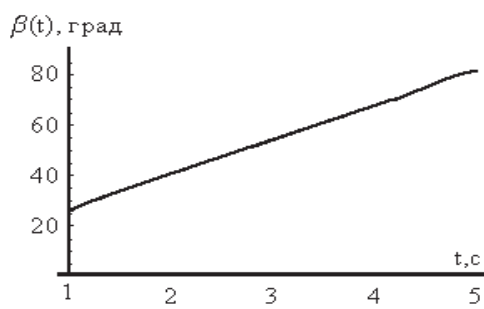
Рис. 8. Кінематика маніпуляційної системи на ділянці пуску



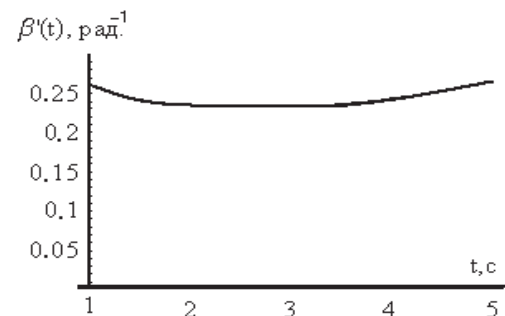
а



б



в



г

Рис. 9. Кінематика маніпуляційної системи на ділянці сталого руху

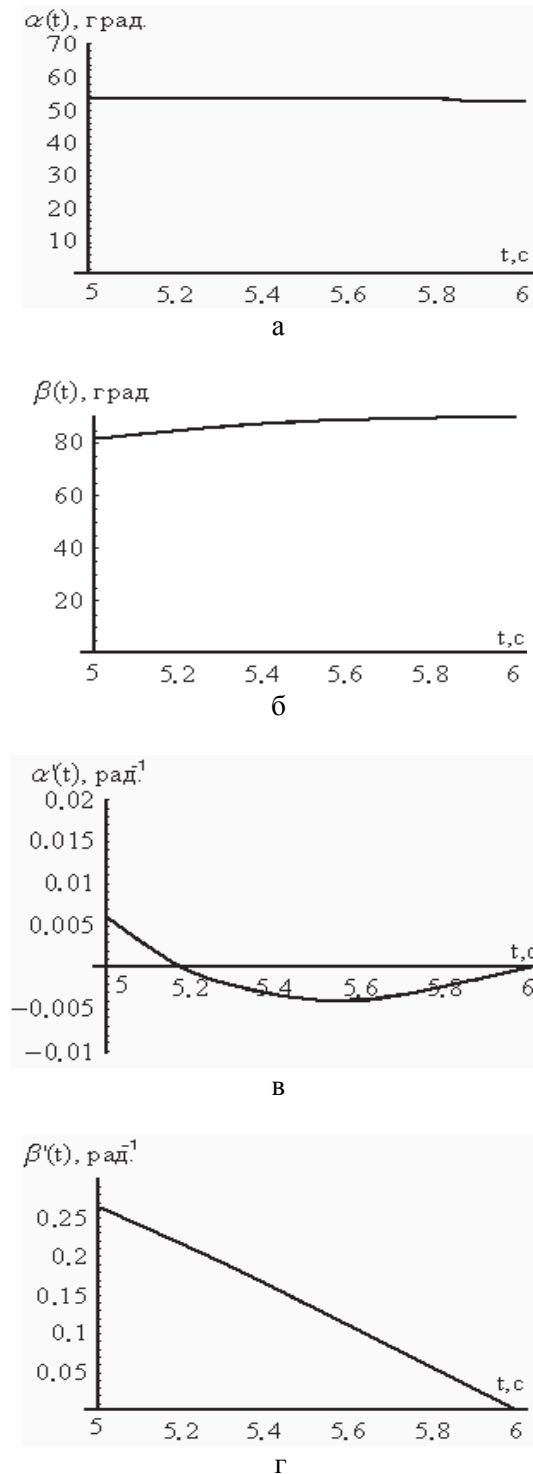


Рис. 10. Кінематика маніпуляційної систем на ділянці гальмування

У процесі дослідження були встановлені величини максимальних кутових прискорень маніпуляційної системи, зокрема визначено: $\ddot{\alpha} = 0,41 \text{ м/с}^2$, $\ddot{\beta} = 0,309 \text{ м/с}^2$. Такі максимуми прискорення виникають на ділянці пуску в момент початку руху.

Висновки

У процесі кінематичного аналізу маніпуляційної системи будівельного робота з двома кутовими узагальненими координатами встановлено характер зміни узагальнених координат маніпулятора залежно від положення вантажу. Було досліджено робочі зони маніпуляційної системи будівельного робота.

Отримані в результаті дослідження співвідношення дають можливість оцінити кінематику зміни руху вантажу, а також синтезувати програмні переміщення вантажу в площині зміни його вильоту.

Для подальших досліджень необхідно розглянути динаміку роботи подібної системи та розробити алгоритм керування.

Література

1. Міщук Д.О. Огляд та аналіз конструкцій робіт для будівельних робіт / Д.О. Міщук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: зб. наук. пр. – 2013. – С. 28–37.
2. Ловейкін В.С. Оптимізація режимів зміни вильоту маніпулятора з гідроприводом / В.С. Ловейкін, Д.О. Міщук. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2013. – 206 с.
3. Кобринский А.А. Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 344 с.
4. Mozasser Rahman. Position control of a four link hyper redundant robotic manipulator / Mozasser Rahman, Raisuddin Khan, Syed Masrur Ahmmad, Masum Billah // Asian journal of scientific research. – 2013. – Vol. 6(1). – P. 66–77.
5. Huashan Liu. An Efficient Inverse Kinematic Algorithm for a PUMA560-Structured Robot Manipulator / Huashan Liu, Wuneng Zhou, Xiaobo Lai and Shiqiang Zhu // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10. – P. 1–5.

Рецензент: Є.С. Венцель, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 4 квітня 2014 р.