

установлено основне качества витока сипучих материалов из бункеров и волнообразований, которые ему сопутствуют.

**Ключевые слова:** *гравитация, движение, волнообразования, анализ*

## **ANALYSIS OF NON-STANDARD GRAVITATIONAL MOTION AND HUILIATION OF BULK MATERIAL IN CONTAINER AT VARIABLE ANGLE OF INTERNAL FRICTION**

***I. M. Sivak, Yu. V. Chovnyuk***

**Abstract.** *An analysis of the unsteady gravitational motion and wave formations of bulk material in a container with a variable angle of internal friction, a comprehensive analysis of the unsteady gravitational motion and possible wave formations of bulk material in a container with an alternating angle of internal friction of the latter, elucidation of the basic laws of the flow of bulk material in a vertical cylinder- / silage) for the so-called. another form of the stream, taking into account the contraction of the specified material / medium and the unstated nature of the movement, is also established mainly by the quality of the flow of bulk materials from the bunkers and wave formations that accompany it.*

**Key words:** *gravity, motion, waveform, analysis*

УДК 621.865.8

## **КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ЛАНОК СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА МЕТОДОМ ОДНОРІДНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЕНАВІТА-ХАРТЕНБЕРГА**

***В. С. Ловейкін, доктор технічних наук***

***О. О. Сподоба аспірант\****

***Національний університет біоресурсів і***

***природокористування України***

***e-mail: sp1309@ukr.net***

**Анотація.** *Обґрунтовано метод однорідних перетворень Денавіта-Хартенберга для визначення кінематичних залежностей переміщення багатоланкової стрілової системи крана-маніпулятора. Орієнтація ланок стрілової системи крана-маніпулятора представлена у матричному вигляді. В даній роботі розв'язана пряма задача кінематики. Вона включає в себе*

**\*Науковий керівник – доктор технічних наук В. С. Ловейкін**

© В. С. Ловейкін, О. О. Сподоба, 2017

визначення положення і орієнтації робочого органу у вибраній системі координат за заданим “значенням” узагальнених координат крана-маніпулятора, однозначно визначаючи його положення, як багатоланкової механічної системи. Отриманні результати кінематичного аналізу планується застосовувати на початковому етапі проектування крана-маніпулятора. Визначено залежності максимальних та мінімальних меж досяжності робочого органу від зміни куткового положення стрілової системи.

У роботі положення і орієнтація робочого органу крана-маніпулятора описані через положення і орієнтацію системи координат, зв'язану з робочим органом по відношенню до інерціальної, базової системи координат. Побудовані номограми характеризують робочу зону крана-маніпулятора. За допомогою графічно зображених залежностей можна знайти положення будь-якої точки на стріловій системі при будь-якому її кутвому положенні. Побудовані номограми дають можливість зрозуміти фізичний зміст залежностей зміни вильоту від зміни куткового положення. Застосовані в роботі однорідні перетворення зручно використовувати для встановлення кінематичних залежностей виконавчих систем кранів-маніпуляторів, опису положення окремих ланок в абсолютній системі координат.

Отримані в роботі результати в подальшому будуть використані при дослідженні динаміки крана маніпулятора та синтезу системи керування.

**Ключові слова:** кінематичний аналіз, кран-маніпулятор, Денавіт-Хартенберг, однорідні перетворення, вектор, система координат, параметр, траєкторія, переміщення

**Постановка проблеми.** Область застосування кранів-маніпуляторів безперервно розширюється, їх функції ускладнюються, конструктивні виконання стрілових систем та елементів приводу відрізняються значним різновидом, при цьому використовуються різні системи координат переміщення ланок стрілової системи крана-маніпулятора і різна кількість ступенів вільності робочого органу. Технічний та технологічний рівень крана-маніпулятора залежить від властивостей його кінематичної схеми, яка дає можливість забезпечити бездоганну роботу крана-маніпулятора в заданій зоні обслуговування. Основним питанням при дослідженні кінематичного аналізу крана-маніпулятора при розгляді технологічного процесу виконання розвантажувально-навантажувальних роботах є потреба помістити робочий орган в певне положення з заданою орієнтацією та в певний час.

**Аналіз останніх досліджень.** Вперше методом однорідних перетворень визначення кінематичних характеристик описаним в

статті скористалися вчені Denavit J., і Hartenberg R. [1]. Методика розрахунку кінематичних залежностей методом однорідних перетворень Денавіта-Хартенберга викладена у посібниках [2–6]. Добрачев А. А., Раєвська Л. Т. та Швець А. В. в своїй роботі [7] широко розглянули кінематичні аспекти, робочу зону кранів-маніпуляторів для лісової промисловості, але не використовували даний метод. Кінематичного дослідження багатоланкових механізмів.

**Метою** є дослідження кінематичних властивостей переміщення ланок стрілової системи багатоланкового крана-маніпулятора у трьохмірному евклідовому просторі за допомогою методу однорідних перетворень Денавіта-Хартенберга.

**Результати досліджень.** Положення і орієнтація робочого органу крана-маніпулятора можуть бути описані через положення і орієнтацію системи координат, зв'язану з робочим органом по відношенню до інерціальної, базової системи координат. З точки зору задачі кінематики механічну систему крана-маніпулятора можна розглянути, як незамкнений багатоланковий кінематичний ланцюг, ланки якого послідовно з'єднані між собою обертальними та зворотно-поступальними зв'язками. Один кінець цього ланцюга закріплений на нерухомому опорно-поворотному механізмі, та зв'язаний з базовою системою координат, а інший кінець вільний та з'єднаний з робочим органом. Кожна кінематична пара складається із ланки та зв'язку, відповідно кран-маніпулятор, зображений на рис. 1, має сім ланок тобто сім ступенів вільності [2].

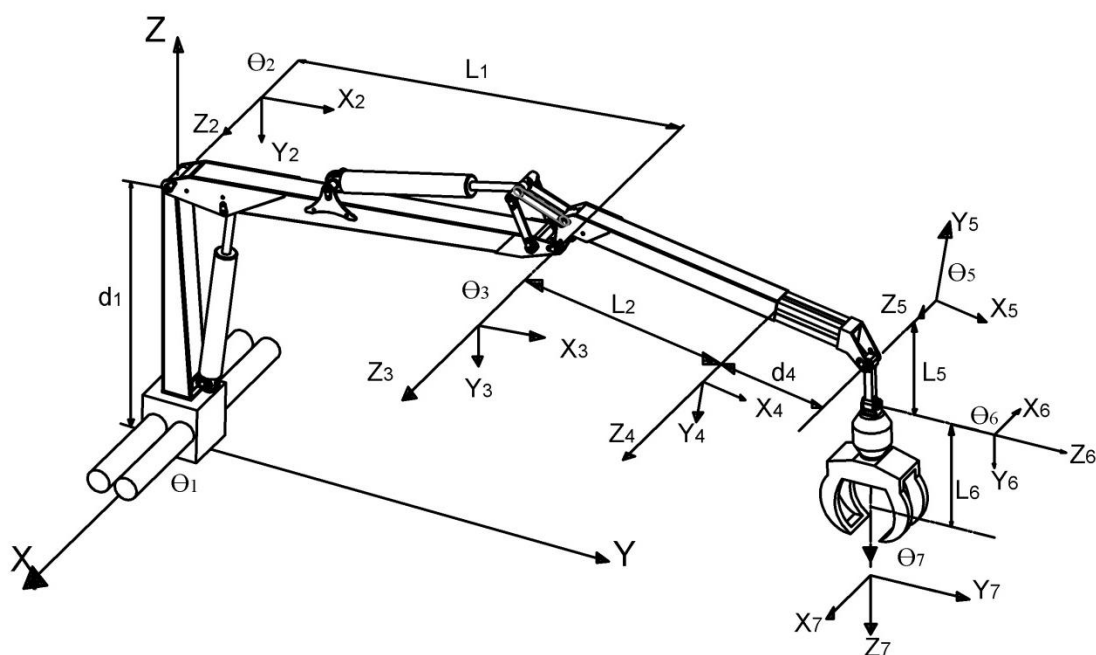


Рис. 1. Формування системи координат крана-маніпулятора.

При дослідженні рухів крана-маніпулятора необхідно знати положення різних точок його ланок в звичайному тривимірному евклідовому просторі. При цьому особливий інтерес представляє положення його кінцевої точки, де розміщений робочий орган. Для отримання відношень положення ланок крана-маніпулятора в тривимірному просторі, які зв'язують декартові координати будь-якої точки крана-маніпулятора в системі координат нерухомої основи з її узагальненими координатами, зручно зв'язувати з кожною ланкою маніпулятора в ортогональній системі координат. Сукупність положення і орієнтації робочого органу можна описати за допомогою матричного подання для опису просторової геометрії маніпулятора, яким вперше скористався Денавіт і Хартенберг [1]. Суть його методу полягає у формуванні однорідної матриці перетворення розмірністю 4x4, яка описує положення системи координат кожної ланки відносно системи координат попередньої ланки. Це дає можливість послідовно перетворювати координати робочого органу крана-маніпулятора із системи відліку зв'язаної з останньою ланкою, в базову систему відліку, яка є інерціальною системою координат. Однорідна матриця перетворення має вигляд [8]:

$$A = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & L_{3 \times 1} \\ P_{1 \times 3} & M \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де:  $R_{3 \times 3}$  – матриця повороту Ейлерових кутів 3x3;  $L_{3 \times 1}$  – матриця положення початку координат повернутої системи відліку відносно абсолютної;  $P_{1 \times 3}$  – матриця перетворення перспективи;  $M$  – масштабний коефіцієнт.

Матриця  $R_{3 \times 3}$  записується:

- для повороту навколо осі  $OX$  на кут  $\alpha$ :

$$R_{\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}; \quad (2)$$

- для повороту навколо осі  $OY$  на кут  $\beta$ :

$$R_{\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}; \quad (3)$$

- для повороту навколо осі  $OZ$  на кут  $\theta$ :

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Геометричні параметри кожної ланки крана-маніпулятора в декартовій системі координат найпростіше записати у матричному вигляді. Кожна матриця описує положення ланки крана маніпулятора відносно абсолютної системи координат  $X, Y, Z$  [9]. У відповідності до рис. 1 кран-маніпулятор має сім ланок. Оскільки ланки маніпулятора можуть здійснювати обертовий та зворотно-поступальний рухи відносно абсолютної системи відліку, для кожної ланки визначається система координат, яка зв'язує ланки між собою, осі якої паралельні осям зчленування ланок. Переміщення та поворот кожної ланки стрілової системи крана-маніпулятора в декартовій системі координат описуються наступними матрицями:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & L_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & L_5 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & L_5 \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$A_6^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & L_6 \cos \theta_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 1 & L_6 \sin \theta_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$A_7^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_7 & -\sin \theta_7 & 0 & 0 \\ \sin \theta_7 & \cos \theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для отримання координат положення робочого органу крана маніпулятора необхідно перемножити матриці (5)–(11). В результаті чого отримуємо матрицю, яка описує положення та орієнтацію робочого органу в абсолютній системі координат,

$$T_7 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4 A_6^5 A_7^6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де:  $\vec{n}, \vec{o}, \vec{a}, \vec{p}$  – проекції одиничних векторів на осі інерціальної системи координат.

З матриці (12) отримано наступні вектори по осях  $x, y, z$ .

Вектор нормалі до робочого органу: по осі  $x$

$$n_x = \sin \theta_1 (\cos \theta_7 \cdot \sin \theta_6 + \cos \theta_6 \cdot \sin \theta_7) - \cos \theta_1 - (\cos \theta_2 \times \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_5 + \cos \theta_5 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5 + \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_5) \times (\cos \theta_6 \cdot \cos \theta_7 - \sin \theta_6 \cdot \sin \theta_7); \quad (13)$$

по осі  $y$ :

$$n_y = -\cos \theta_3 \cdot \cos \theta_6 \cdot \cos \theta_7 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5 + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_7 \times \sin \theta_6 + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_6 \cdot \sin \theta_7 + \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5 \times \sin \theta_6 \cdot \sin \theta_7 + \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_1 (\cos \theta_3 \cdot \cos \theta_5 - \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_5) \times (\cos \theta_6 \cdot \cos \theta_7 - \sin \theta_6 \cdot \sin \theta_7) + \cos \theta_5 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_3 \times (-\cos \theta_6 \cdot \cos \theta_7 + \sin \theta_6 \cdot \sin \theta_7); \quad (14)$$

по осі  $z$ :

$$n_z = (-\cos \theta_3 \cdot \cos \theta_5 \cdot \sin \theta_2 - \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_5 \cdot \sin \theta_5 + \sin \theta_2 \times \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_5) \cdot (\cos \theta_6 \cdot \cos \theta_7 + \sin \theta_6 \cdot \sin \theta_7). \quad (15)$$

Дотичний вектор робочого органу: по осі  $x$

$$o_x = \sin \theta_6 (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_7 (-\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_5 + \cos \theta_5 \cdot \sin \theta_2 \times \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5 + \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_3 \cdot \sin \theta_5) - \sin \theta_1 \times \sin \theta_7) + \cos \theta_6 (\cos \theta_7 \cdot \sin \theta_1 + \cos \theta_1 (-\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_5 + \cos \theta_5 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \cdot \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_5 + \cos \theta_2 \cdot \sin \theta_3 \times \sin \theta_5) \sin \theta_7); \quad (16)$$

по осі  $y$ :

$$o_y = \sin\theta_1(-\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \cos\theta_5 + \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 + \cos\theta_2 \times \\ \times \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_5)(\cos\theta_7 \cdot \sin\theta_6 - \cos\theta_6 \cdot \sin\theta_7) + \\ + \cos\theta_1(\cos\theta_6 \cdot \cos\theta_7 + \sin\theta_6 \cdot \sin\theta_7); \quad (17)$$

по осі  $z$ :

$$o_z = (\cos\theta_3 \cdot \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_3 + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \times \\ \times \sin\theta_5 - \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_5)(\cos\theta_7 \cdot \sin\theta_6 - \cos\theta_6 \cdot \sin\theta_7). \quad (18)$$

Вектор підходу робочого органа: по осі  $x$

$$a_x = -\cos\theta_1(\cos\theta_3 \cdot \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_3 + \\ + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_5 - \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_5); \quad (19)$$

по осі  $y$ :

$$a_y = -\sin\theta_1(\cos\theta_3 \cdot \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_3 + \\ + \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_5 - \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_5); \quad (20)$$

по осі  $z$ :

$$a_z = -\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \cos\theta_5 + \cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 + \\ + \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_5 + \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_5. \quad (21)$$

Вектор положення робочого органу: по осі  $x$ :

$$p_x = \cos\theta_1(\cos\theta_2(L_2 + \cos\theta_3(d_4 + L_3 + \cos\theta_5 \cdot L_5 + \cos\theta_5 \times \\ \times \cos\theta_6 \cdot L_6 - (L_5 + \cos\theta_6 \cdot L_6)\sin\theta_3 \cdot \sin\theta_3)) - \sin\theta_2 \times \\ \times (d_4 \cdot \sin\theta_3 + L_3 \cdot \sin\theta_3 + (L_5 + \cos\theta_6 \cdot L_6) \times \\ \times (\cos\theta_5 \cdot \sin\theta_3 + \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_5))) + L_6 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_6; \quad (22)$$

по осі  $y$ :

$$p_y = -d_4 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 - \cos\theta_5 \cdot L_5 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 - \\ - \cos\theta_5 \cdot \cos\theta_6 \cdot L_6 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 - \cos\theta_3 \cdot L_5 \cdot \sin\theta_1 \times \\ \times \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_5 - \cos\theta_3 \cdot \cos\theta_6 \cdot d_6 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_5 + \\ + \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_1(L_2 + \cos\theta_3(d_4 + L_3 + \cos\theta_5 \cdot L_5 + \cos\theta_5 \cdot \cos\theta_6 \times \\ \times L_6) - (L_5 + \cos\theta_6 \cdot L_6)\sin\theta_3 \cdot \sin\theta_5) + \cos\theta_1 \cdot L_6 \cdot \sin\theta_6; \quad (23)$$

по осі  $z$ :

$$p_z = d_1 - L_2 \cdot \sin\theta_2 - \cos\theta_2 \cdot d_4 \cdot \sin\theta_3 - \cos\theta_2 \cdot L_3 \cdot \sin\theta_3 - \\ - \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \cdot L_5 \cdot \sin\theta_3 - \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_5 \cdot \cos\theta_6 \cdot L_6 \cdot \sin\theta_3 + \\ + L_5 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_5 + \cos\theta_6 \cdot L_6 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_3 \cdot \sin\theta_5 - \\ - \cos\theta_3(d_4 \cdot \sin\theta_2 + L_3 \cdot \sin\theta_2 + (L_5 + \cos\theta_6 \cdot L_6) \times \\ \times (\cos\theta_5 \cdot \sin\theta_2 + \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_5)). \quad (24)$$

Підставивши значення та чисельно розв'язавши задачу за допомогою прикладних комп'ютерних програм, отримані результати проілюстровано графічно.

Номограми зображені на рис. 2, рис. 3 та рис. 4 дають можливість зрозуміти фізичний зміст зміни вильоту від зміни кутового положення. За допомогою графічно зображених залежностей можна знайти положення будь-якої точки на стріловій системі при будь-якому її кутовому положенні.

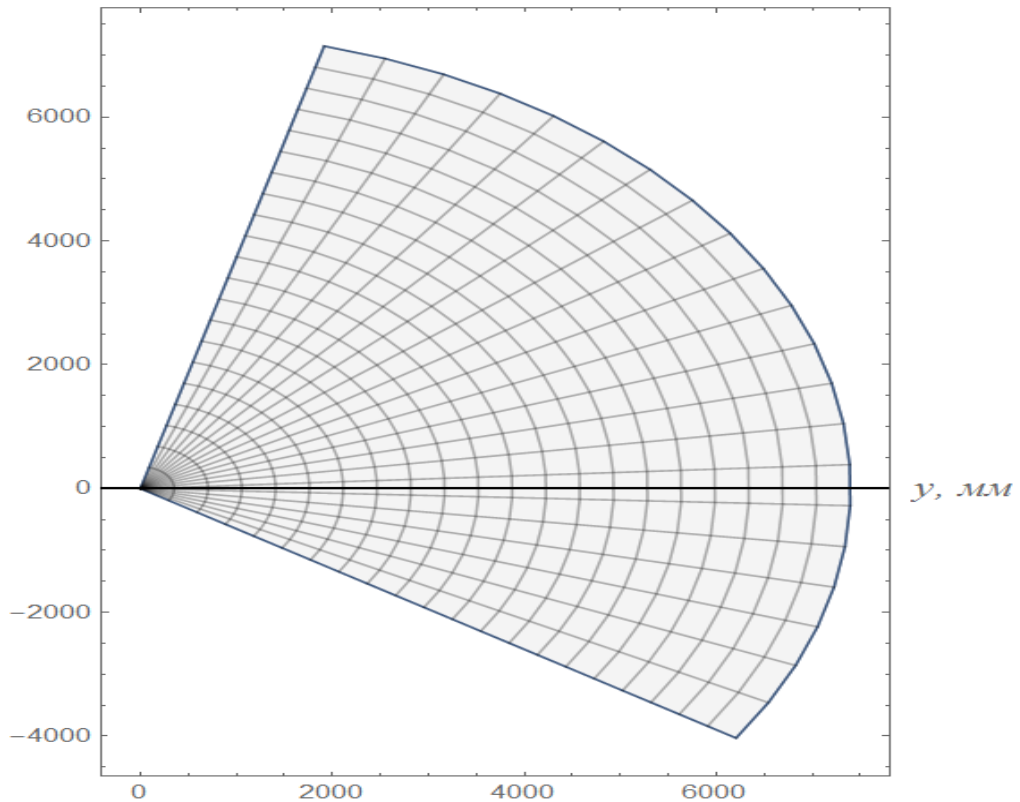


Рис. 2. Номограма переміщення стрілової системи на площинні YZ та XZ. Крок сітки номограми  $10^\circ$ .

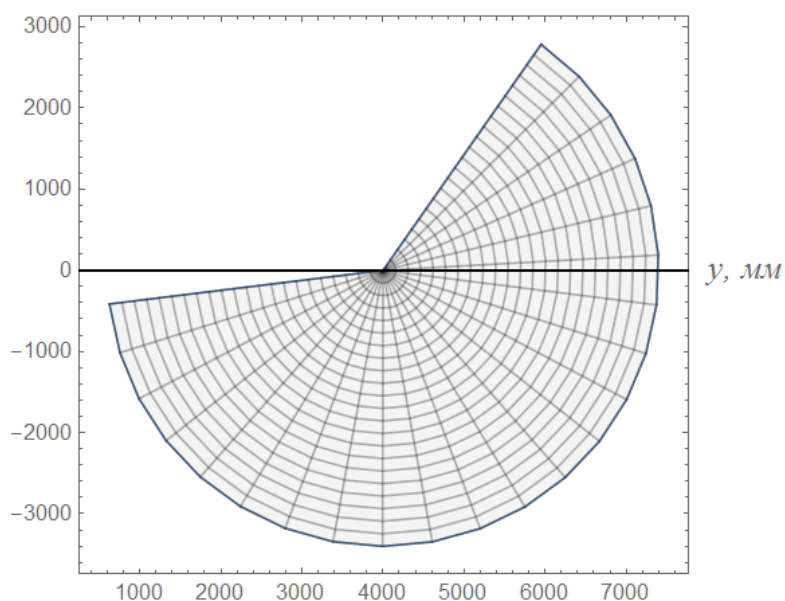


Рис. 3. Номограма переміщення рукояті крана маніпулятора на площинні YZ. Крок сітки номограми  $10^\circ$ .



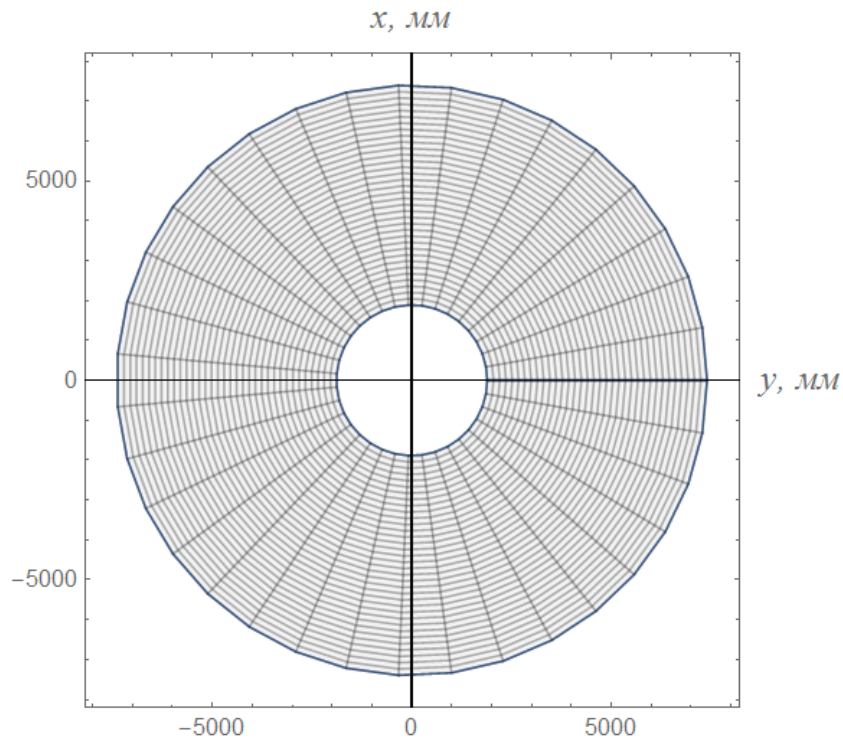


Рис. 4. Номограма переміщення стрілової системи на площині  $YX$ . Крок сітки номограми  $10^\circ$ .

З рис. 2 видно залежність зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора від зміни кутового положення. Проаналізувавши рис. 2, можна визначити: максимальне значення робочої зони по висоті підйому 7050 мм; максимальний виліт за умови паралельності стрілової системи поверхні землі – 7300 мм; мінімальне значення опускання стріли – 3975 мм.

На рис. 3 зображено номограму обертання рукояті з максимально висунутою телескопічною стрілою навколо осі кріплення рукояті. При детальному розгляді даного графіка можна зазначити, що робоча зона рукояті знаходиться у межах від 3200 мм до 2600 мм, максимальний виліт стрілової системи становить 7300 мм. Номограма зображена на рис. 4, дає можливість зобразити робочу зону крана-маніпулятора при обертанні стрілової системи навколо осі  $Z$  (рис. 1). З графічно зображеної номограми видно що межа досяжності робочого органу, при умові що стріла та рукоять паралельні земній поверхні, максимальний виліт стріли становить 7300 мм, а робоча зона знаходиться у межах від 1880 мм до 7300 мм.

**Висновок.** Розглянуті в роботі однорідні перетворення зручно використовувати для встановлення кінематичних відношень виконавчих систем маніпуляторів, опису положення окремих ланок в абсолютній системі координат. Розв'язавши задачу кінематики для даного крана-маніпулятора та побудувавши графічні залежності,

можно легко найти положения точек на стреловой системе при певном кутовом положенні. Отримані в роботі результати в подальшому будуть використані при досліджені динаміки крана-маніпулятора та синтезу системи керування.

### Список літератури

1. Denavit J., Hartenberg R. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices, J. Appl. Mech. 1955. Vol. 77. P. 215–221.
2. Спыну Г. А. Промышленные роботы. Конструирование и применение. Киев. Выща школа. 1991. 311 с.
3. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. Москва. Мир. 1989. 624 с.
4. Шахинпур М. Курс робототехники. Москва. Мир. 1990. 527 с.
5. Юревич Е. И. Основы робототехники. Ленинград. Машиностроение. 1985. 217 с.
6. Накано Э. Ведение в робототехнику. Москва. Мир. 1988. 334 с.
7. Добрачев А. А., Раевская Л. Т., Швеиц А. В. Кинематические схемы, структуры и расчет параметров лесопромышленных манипуляторных машин. Екатеринбург. Уральский государственный лесотехнический университет. 2014. 128 с.
8. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. Методы управления робототехническими приложениями. Петербург. 2016. 108 с.
9. Климчик А. С., Гомолицкий Р. И., Фурман Ф. В., Сёмкин К. И. Разработка управляющих программ промышленных роботов. Минск. БГУИИР. 2004. 131 с.

### References

1. Denavit J., Hartenberg R. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. J. Appl. Mech. Vol. 77. 215–221.
2. Spynu H. A. (1991). Industrial robotics. Design and application. Vyshcha shkola Kiev. 311.
3. Fu K., Honsales R., Li K. (1989). Robotics. Moscow. Myr. 624.
4. Shakhinpur M. (1990). Course robotics. Moscow. Myr. 527.
5. Yurevich E. I. (1985). Fundamentals of Robotics. Mashynostroenye. Leningrad. 217.
6. Nakano E. (1988). Conducting in robotics. Moscow. Myr. 334.
7. Dobrachev A. A., Rayevska L. T., Shvets A. V. (2014). Kinematic schemes, the structure and calculation of parameters of forestry manipulators. Ekaterinburg. Ural State Forestry University. 128.
8. Borisov O. I., Hromov V. S., Pyrkin A. A. (2016). Methods for controlling robotic applications. Petersburg. Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. 108.
9. Klimchik A. S., Homolitskiy R. I., Furman F. V., Syemkin K. I. (2004). Development of control programs for industrial robots. Minsk. 131.

## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗВЕНЬЕВ СТРЕЛОВОЙ СИСТЕМЫ КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА МЕТОДОМ ОДНОРОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЕНАВИТА-ХАРТЕНБЕРГА

**В. С. Ловеикин, А. А. Сподоба**

**Аннотация.** Обоснованный метод однородных преобразований Денавита-Хартенберга для получения

кинематических зависимостей перемещения многозвенчатой стреловой системы крана-манипулятора. Ориентация звеньев стреловой системы крана-манипулятора представлена в матричном виде. В данной работе развязана прямая задача кинематики. Она включает в себя определение положения и ориентации рабочего органа в выбранной системе координат по заданным “значениям” обобщенных координат крана-манипулятора, однозначно определяя его положение, как многозвенчатой механической системы. Полученные результаты кинематического анализа планируется использовать на начальном этапе проектирования крана манипулятора. Определены зависимости максимальных и минимальных расстояний досягаемости рабочего органа от изменения углового положения стреловой системы.

В работе положения и ориентация рабочего органа крана-манипулятора описаны через положение и ориентацию системы координат, связанную с рабочим органом по отношению к инерциальной, базовой системе координат. Построенные номограммы характеризуют рабочую зону крана-манипулятора. При помощи графически изображенных зависимостей можно найти положение любой точки на стреловой системе при любом её угловом положении. Построенные номограммы дают возможность понять физическое содержание зависимостей изменения вылета от изменения углового положения. Используемые в работе однородные преобразования удобно использовать для установления кинематических зависимостей исполнительных систем кранов-манипуляторов, описания положения отдельных звеньев в абсолютной системе координат.

Полученные в работе результаты в дальнейшем будут использованы при исследовании динамики крана-манипулятора и синтеза системы управления.

**Ключевые слова:** кинематический анализ, кран-манипулятор, Денавит-Хартенберг, однородные преобразования, вектор, система координат, параметр, траектория, перемещение

**KINEMATICAL ANALYSIS OF SPATIAL MOVEMENT OF ARM  
SYSTEM OF CRANE-MANIPULATOR BY METHOD OF  
HOMOGENEOUS TRANSFORMATIONS OF DENAVIT-HARTENBERG  
V. S. Loveikin, O. O. Spodoba**

**Abstract.** Method of homogeneous transformation of Denavit-Hartenberg for calculating kinematical dependences movement of the crane-manipulator outrigger is substantiated. Orientation of outrigger's

links of crane-manipulator is introduced in the matrix system. In this work direct problem of kinematical is solved. This problem include determination position and orientation executive organ in the determinate co-ordinates of meaning generalize co-ordinates of the crane-manipulator, simple in position as many section mechanical system. The results kinematical analysis can be used on first stage project crane-manipulator. The depending of maximum and minimum distances executive organ from change angle position arm system is determined.

In the work position and orientation executive organ of crane-manipulator are described by position and orientation co-ordinates of executive organ relatively basic co-ordinates. The graph shows trajectory movement of outrigger. Using of the graph can to fine position any point on outrigger, by any angle position. This graphical dependence makes it possible to understand the physical meaning of the dependence change distances of outrigger from change angle position. The homogeneous transformation is used to calculating kinematical dependences executive systems crane-manipulator and description of position individual link in absolute system co-ordinate.

The results obtained can be further used to research dynamics system crane-manipulator and synthesis control system.

**Key words:** *kinematical analysis, crane-manipulator, Denavit-Hartenberg, homogeneous transformation, vector, co-ordinates, parameters, trajectory, movement*

УДК 378.147: 631

## **СТАНОВЛЕННЯ ВІТЧИЗНЯНОЇ СИСТЕМИ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ІНЖЕНЕРІВ**

**О. А. Дьомін, кандидат педагогічних наук  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України  
e-mail: demin31@gmail.com**

**Анотація.** У статті аналізується специфіка становлення системи ВНЗ з інженерної підготовки, а також здійснюється огляд зародження сільськогосподарського напрямку у вітчизняній інженерії. Проведено узагальнення стосовно зародження професійної підготовки інженерів з механізації сільського господарства. Як показує проведений нами аналіз створення

© О. А. Дьомін, 2017