

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СТРІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА ПІД ЧАС ПУСКУ ЗА ЗАКОНОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИСКОРЕНЬ

Дмитро Паламарчук

Київський національний університет будівництва і архітектури,
03680, Повітрофлотський пр-т, 31, Київ, Україна, e-mail: palamarchuk-dima@ukr.net

STUDY OF MOTION BOOM CRANE DURING START STATUTORY OPTIMIZATION ACCELERATED

Dmitro Palamarchuk

Kyiv National University of Construction and Architecture,
03680, Povitroflotsky avenue 31, Kyiv, Ukraine, e-mail: palamarchuk-dima@ukr.net

АНОТАЦІЯ. Представлені результати теоретичного дослідження кінематичних та силових параметрів шарнірно-зчленованої стрілової системи порталного крана. Дослідження проведено під час розгону, за умови руху стрілової системи за законом оптимізації прискорень. Отримано результати досліджуваних параметрів за різної тривалості розгону. Розроблено рекомендації щодо вибору тривалості розгону стрілової системи. Наведено графіки зміни досліджуваних параметрів в часі, що побудовані в системі MathCAD 15.

Ключові слова: кран, стрілова система, рух, координата, швидкість.

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты теоретического исследования кинематических и силовых параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы порталного крана. Исследования проведены во время разгона, при условии движения стреловой системы по закону оптимизации ускорений. Получены результаты исследованных параметров при разной длительности разгона. Разработаны рекомендации по выбору длительности разгона стреловой системы. Приведены графики изменения исследуемых параметров во времени, которые построены в системе MathCAD 15.

Ключевые слова: кран, стреловая система, движение, координата, скорость.

ABSTRACT. Purpose. Research boom system while driving legally optimize acceleration at launch site. **Methodology/approach.** The study was conducted under the condition of minimizing the integrand functions. Used numerical methods of solution indefinite integrals. **Findings.** The results of the studied parameters for varying lengths of acceleration. **Research limitations/implications.** The recommendations regarding the choice of boom length dispersal system. Shows a graph of the studied parameters over time, built in the MathCAD 15. **Originality/value.** In practice, it is advisable to apply the law to optimize acceleration difference between the center of mass of the load and the end point of the trunk. The application of this law in the automatic system managed actuator allow for horizontal movement of cargo with minimal vibrations and minimum load on the drive elements, which increases the efficiency of cranes.

Key words: crane, jib system, movement, coordinate, speed.

ВСТУП

При зміні вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи (ШЗСС) крана вантажний канат з підвішеним вантажем відхиляється від вертикалі. Максимальні відхилення канату відбуваються під час перехідних процесів руху і досягають 10...12°. Це явище негативно впливає на техніко-економічні показники крана [1].

В роботі [2] запропоновано чотири закони руху ШЗСС з вантажем, які дозволяють суттєво мінімізувати кут відхилення вантажного канату від вертикалі. Однак аналітично встановлено, що на практиці можуть використовуватися лише режими руху за законом оптимізації прискорень [3] або ж ривків [4].

МЕТА РОБОТИ

Аналіз кінематичних та силових параметрів ШЗСС, які отримані при русі за законом оптимізації прискорень, показав, що оптимізація повного циклу зміни вильоту стрілової системи не дозволяє повністю розкрити характер руху стрілової системи. Крім того, на практиці досить рідко виникає така ситуація, коли вантаж переміщується від мінімального вильоту до максимального. Здебільшого переміщення вантажу здійснюється на певну частину вильоту. В зв'язку з цим доцільно провести дослідження стрілової системи при русі за законом оптимізації прискорень лише на ділянці пуску.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Як встановлено раніше [3], режим руху, що забезпечує мінімальну різницю між прискореннями кінцевої точки хобота D і центру мас вантажу (рис. 1), визначається умовою

$$\sum_{i=1}^n |\ddot{x} - \ddot{x}_D| \rightarrow \min, \quad (1)$$

де \ddot{x} – горизонтальне прискорення вантажу; \ddot{x}_D – горизонтальне прискорення кінцевої точки хобота.

Ця умова забезпечується інтегральним функціоналом, який відображає суму квадратів відхилення прискорень на всій ділянці руху

$$\Delta \ddot{x}^2 = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} (\ddot{x} - \ddot{x}_D)^2 dt = \frac{H^2}{g^2 t_1} \int_0^{IV} x^2 dt, \quad (2)$$

де t_1 – тривалість руху стрілової системи, H – висота вісі обвідного блока над кореневим шарніром стріли.

Підінтегральний вираз цього функціоналу відображає геометричні співвідношення між горизонтальними координатами вантажу x і кінцевої точки хобота x_D та висотою H . Вказаний функціонал записано для ШЗСС крана МАРК-40 з такими параметрами:

- мінімальний виліт $S_{min} = 7,4 м$;
- максимальний виліт $S_{max} = 30 м$;
- середня швидкість зміни вильоту $V = 1,05 м/с$;

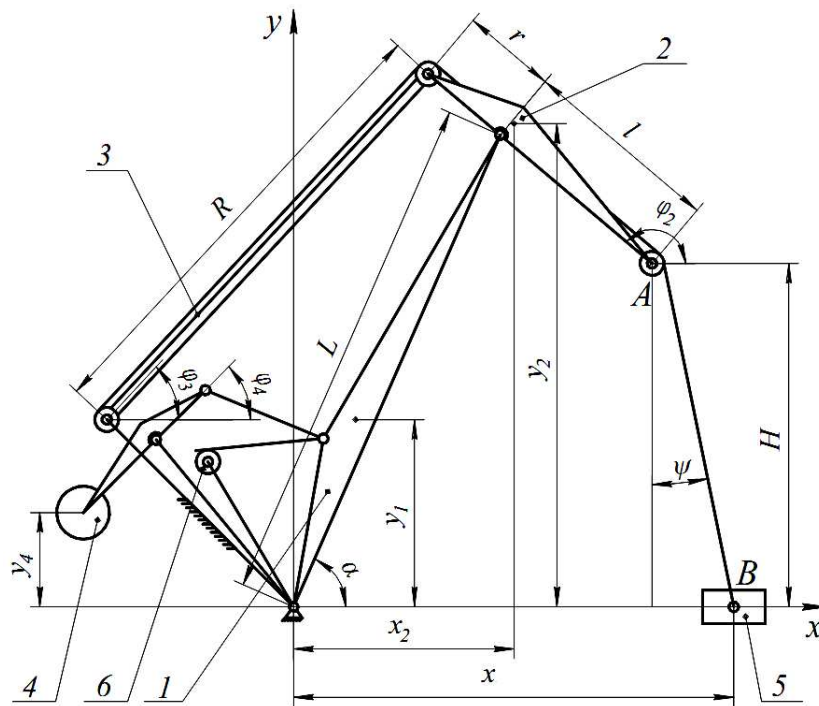


Рис. 1. Схема шарнірно-зчленованої стрілової системи з рейковим механізмом зміни вильоту: 1 – стріла; 2 – прямолінійний хобот; 3 – відтяжка; 4 – противага; 5 – вантаж; 6 – привідна шестерня; y_1, y_2, y_4 – вертикальні координати центрів мас відповідно стріли, хобота і противаги; x_2, x – горизонтальні координати центрів мас відповідно хобота і вантажу; α – кутова координата стріли; ϕ_2, ϕ_3, ϕ_4 – кутові координати відповідно хобота, відтяжки та коромисла противаги; L – довжина стріли; l – довжина хобота; r – довжина контрхобота; R – довжина відтяжки; H – довжина підвісу вантажу; ψ – кут відхилення вантажного канату від вертикалі

Fig. 1. Scheme articulated boom system with Raked luffing mechanism: 1 - boom; 2 - straight trunk; 3 - guy; 4 - balances; 5 - cargo; 6 - the driving gear; y_1, y_2, y_4 - vertical coordinates of the centers of mass, respectively correeboom, trunk and balances; x_2, x - horizontal coordinates of the centers of mass, respectively, trunk and cargo; α - angle coordinate arrows; ϕ_2, ϕ_3, ϕ_4 - angular coordinates, respectively trunk, from serious and rocker-counter; L - length of the boom; l - length of the trunk; r - the length straight trunk; R - the length of procrastination; H - the length of the suspension of the cargo; ψ - the deflection angle from the vertical hoist rope

- час зміни вильоту від мінімального до максимального $t = 22c$;
- довжина стріли $L = 25,76m$;
- довжина хобота $l = 10,16m$;
- довжина підвісу вантажу $H = 14,7m$;
- маса стріли $m_1 = 12650kg$;
- маса хобота (разом з контрхоботом) $m_2 = 5423kg$;
- маса відтяжки $m_3 = 3114kg$;
- маса противаги $m_4 = 13525kg$;
- середня вантажопідйомність крана на основному гаку $m = 20000kg$.

Функціонал (2) досягає мінімуму при функціях, які є розв'язком Ейлера-Пуассона, і набуває вигляду [2]

$$\frac{\partial x}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial x}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial x}{\partial \ddot{x}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial x}{\partial \ddot{x}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial x}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Наведене рівняння зводиться до диференціального рівняння восьмого порядку

$$x = 0. \quad (4)$$

Після інтегрування за часом, отримується система рівнянь

$$\begin{aligned} x &= A_1; \quad \dot{x} = A_1 t + A_2; \quad \ddot{x} = \frac{1}{2} A_1 t^2 + A_2 t + A_3; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{6} A_1 t^3 + \frac{1}{2} A_2 t^2 + A_3 t + A_4; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{24} A_1 t^4 + \frac{1}{6} A_2 t^3 + \frac{1}{2} A_3 t^2 + A_4 t + A_5; \\ \ddot{x} &= \frac{1}{120} A_1 t^5 + \frac{1}{24} A_2 t^4 + \frac{1}{6} A_3 t^3 + \frac{1}{2} A_4 t^2 + A_5 t + A_6; \\ \dot{x} &= \frac{1}{720} A_1 t^6 + \frac{1}{120} A_2 t^5 + \frac{1}{24} A_3 t^4 + \frac{1}{6} A_4 t^3 + \\ &+ \frac{1}{2} A_5 t^2 + A_6 t + A_7; \\ x &= \frac{1}{5040} A_1 t^7 + \frac{1}{720} A_2 t^6 + \frac{1}{120} A_3 t^5 + \frac{1}{24} A_4 t^4 + \\ &+ \frac{1}{6} A_5 t^3 + \frac{1}{2} A_6 t^2 + A_7 t + A_8, \end{aligned} \quad (5)$$

де $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ – постійні інтегрування, які визначаються за крайовими умовами руху.

Під час руху стрілової системи на ділянці пуску крайові умови мають вигляд

$$\begin{aligned} t = 0, x = x_0, \dot{x} = \ddot{x} = \ddot{x} = 0; \\ t = t_1, \dot{x} = v, \ddot{x} = \ddot{x} = \ddot{x} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

де x_0 – горизонтальна координата вантажу на початку руху стрілової системи; t_1 – час розгону до виходу на усталену швидкість; v – швидкість горизонтального переміщення вантажу при усталеному русі.

За вказаних крайових умов постійні інтегрування мають вигляд

$$\begin{aligned} A_1 &= -7200 \frac{v}{t_1^6}; \quad A_2 = 4320 \frac{v}{t_1^5}; \\ A_3 &= -1080 \frac{v}{t_1^4}; \quad A_4 = 120 \frac{v}{t_1^3}; \\ A_5 &= A_6 = A_7 = 0; \quad A_8 = x_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Після їх підстановки у систему (5) визначено режим руху вантажу, що забезпечує мінімальне середньоквадратичне відхилення між прискоренням вантажу та прискоренням кінцевої точки хобота на ділянці розгону:

$$\begin{aligned} x &= \rho + x_0 - \frac{10vt^7}{7t_1^6} + \frac{6vt^6}{t_1^5} - \frac{9vt^5}{t_1^4} + \frac{5vt^4}{t_1^3}; \\ \dot{x} &= -\frac{10vt^6}{t_1^6} + \frac{36vt^5}{t_1^5} - \frac{45vt^4}{t_1^4} + \frac{20vt^3}{t_1^3}; \\ \ddot{x} &= -\frac{60vt^5}{t_1^6} + \frac{180vt^4}{t_1^5} - \frac{180vt^3}{t_1^4} + \frac{60vt^2}{t_1^3}; \\ \ddot{x} &= -\frac{300vt^4}{t_1^6} + \frac{720vt^3}{t_1^5} - \frac{540vt^2}{t_1^4} + \frac{120vt}{t_1^3}; \\ \ddot{x} &= -\frac{1200vt^3}{t_1^6} + \frac{2160vt^2}{t_1^5} - \frac{1080vt}{t_1^4} + \frac{120v}{t_1^3}; \\ \ddot{x} &= -\frac{3600vt^2}{t_1^6} + \frac{4320vt}{t_1^5} - \frac{1080v}{t_1^4}. \end{aligned} \quad (8)$$

З врахуванням підінтегральної функції виразу (2) та кінематичних параметрів вантажу (8) знайдено вирази для визначення кінематичних параметрів руху кінцевої точки хобота:

$$x_D = x + \frac{H}{g} \ddot{x}; \dot{x}_D = \dot{x} + \frac{H}{g} \ddot{x};$$

$$\ddot{x}_D = \ddot{x} + \frac{H}{g} \overset{IV}{x}; \overset{V}{\ddot{x}}_D = \overset{V}{\ddot{x}} + \frac{H}{g} x. \quad (9)$$

Кут нахилу стріли до горизонту визначається з виразу

$$\alpha = \arccos z, \quad (10)$$

де z – розв’язок квадратного рівняння, що характеризує кінематичні залежності між ланками ШЗСС крана. Визначення параметру z в повному обсязі наведено в роботах [2, 3].

Кутова швидкість стріли в будь-який момент руху ШЗСС визначається з виразу

$$\dot{\alpha} = -\frac{\dot{z}}{\sqrt{1-z^2}}, \quad (11)$$

де \dot{z} – параметр z з виразу (10) продиференційований за часом.

Вираз для визначення кутового прискорення стріли має вигляд

$$\ddot{\alpha} = -\frac{\ddot{z}}{\sqrt{1-z^2}} - \frac{\dot{z}^2 z}{(1-z^2)^{3/2}}, \quad (12)$$

де \ddot{z} – друга похідна за часом від параметру z .

Оскільки, однією з найбільш навантажених ланок ШЗСС крана є зубчаста рейка приводного механізму b (рис. 1), то доцільно дослідити зміну внутрішнього зусилля в ній під час руху на ділянці розгону. Загальне внутрішнє зусилля в рейці знаходиться з рівності

$$F = F_C + F_D, \quad (13)$$

де F_C, F_D – відповідно статичне та динамічне внутрішнє зусилля в рейці. Вирази для знаходження F_C та F_D наведені в роботі [5].

За формулами (8-13) було проведено визначення кінематичних та силових параметрів ШЗСС під час руху на ділянці пуску. При дослідженні були зафіксовані мінімальні та максимальні значення таких параметрів: x, \dot{x}, \ddot{x} – відповідно горизонтальна координата, швидкість та прискорення вантажу; $x_D, \dot{x}_D, \ddot{x}_D$ – відповідно горизонтальна координата, швидкість та прискорення кінцевої точки хобота; $\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ – відповідно

кутові координата, швидкість та прискорення стріли; F_C, F_D, F – відповідно статичне, динамічне та повне зусилля в зубчастій рейці. Отримані дані зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати дослідження при різній тривалості пуску

Table 1. Results of the study at different length of start

Параметр	Час пуску t_1, c					
	3	3,5	4	4,5	5	
x, m	min	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
	max	10,3	10,6	10,9	11,2	11,5
$\dot{x}, m/c$	min	0	0	0	0	0
	max	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
$\ddot{x}, m/c^2$	min	0	0	0	0	0
	max	0,73	0,62	0,54	0,48	0,44
x_D, m	min	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
	max	10,3	10,6	10,9	11,2	11,5
$\dot{x}_D, m/c$	min	-0,15	0	0	0	0
	max	1,48	1,11	1,05	1,05	1,05
$\ddot{x}_D, m/c^2$	min	-1,9	-1,04	-0,56	-0,31	-0,15
	max	6,99	4,41	2,95	2,07	1,51
α, rad	min	1,26	1,26	1,25	1,25	1,24
	max	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
$\dot{\alpha}, rad/c$	min	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
	max	0,002	0	0	0	0
$\ddot{\alpha}, rad/c^2$	min	-0,09	-0,06	-0,04	-0,03	-0,02
	max	0,03	0,02	0,008	0,004	0,001
F_C, kH	min	-44,17	-44,17	-44,17	-44,17	-44,17
	max	-27,02	-25,03	-23,28	-21,75	-20,41
F_D, kH	min	5,78	5,33	4,95	4,64	4,38
	max	250,1	157,47	105,49	79,26	77,15
F, kH	min	-21,23	-19,7	-18,33	-17,12	-16,03
	max	205,88	113,29	61,32	46,39	43,76

Вказані параметри зафіксовано при різній тривалості розгону стрілової системи до усталеної швидкості. Тривалість розгону в межах 3...5 с обрана, виходячи з рекомендацій та вимог до електроприводу механізмів кранів, що наведені в [6].

Аналіз отриманих результатів показує, що тривалість розгону $t_1 = 3c$ не може бути використана, тому що на початку руху виникають значні рушійні прискорення стрілової системи. Для виходу на усталену швидкість система швидко розганяється і потім гальмується – це призводить до зміни напрямку швидкості кінця хобота. Такий швидкий розгін спричинює виникнення

значних динамічних зусиль в зубчастій рейці $F_D = 250,1 \text{ кН}$.

При тривалості розгону $t_1 = 3,5 \text{ с}$ відбувається більш плавний розгін стрілової системи. Зменшення максимального прискорення вантажу на 14...16% забезпечило зменшення внутрішнього зусилля в рейці майже вдвічі. Однак його пікове значення залишається дуже високим $F = 113,29 \text{ кН}$.

Набагато сприятливіші швидкісні характеристики стрілова система має при тривалості пуску $t_1 = 4 \text{ с}$ – відбувається плавна зміна швидкості та прискорення кінцевої точки хобота. При цьому також забезпечується плавність зміни зусилля в рейці, і його максимальне значення становить $F = 61,32 \text{ кН}$.

При подальшому збільшенні тривалості пуску до $t_1 = 4,5...5 \text{ с}$ характер кінематичних параметрів ШЗСС і вантажу майже не змінюється, хоча дещо покращується плавність навантаження зубчастої рейки. Однак збільшення тривалості пуску веде до суттєвого збільшення вильоту стрілової системи, що відбувається за час розгону.

Тому найбільш прийнятним буде час пуску $t_1 = 4 \text{ с}$.

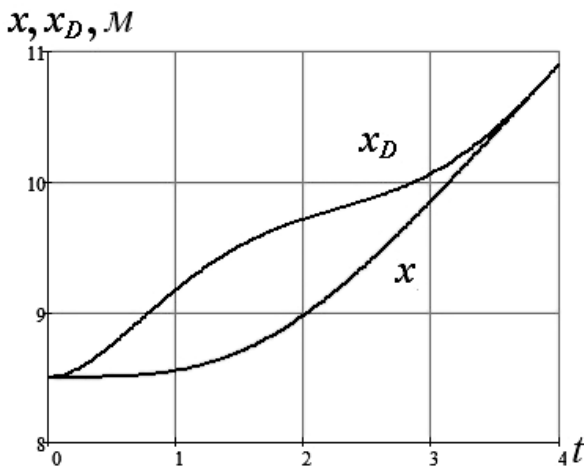


Рис 2. Графіки зміни горизонтальних координат
Fig. 2. Graphs changes of horizontal coordinates

Для повного відображення кінематичних та силових параметрів при тривалості пуску $t_1 = 4 \text{ с}$ побудовано графіки зміни горизонтальної координати вантажу та точки D хобота (рис. 2), горизонтальних швидкостей (рис. 3) та прискорень (рис. 4) цих точок.

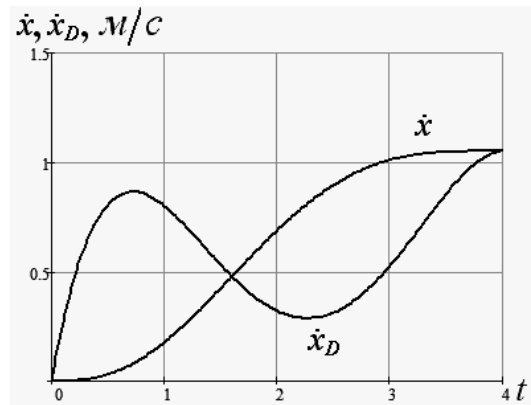


Рис 3. Графіки зміни швидкостей
Fig. 3. The schedule change of speeds

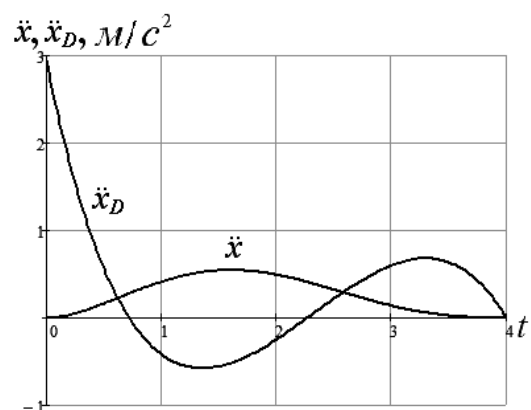


Рис 4. Графіки зміни прискорень
Fig. 4. The graphics changes of acceleration

Для аналізу кінематики руху стріли під час пуску побудовано графіки зміни її кутової координати (рис. 5), кутової швидкості (рис. 6) та кутового прискорення (рис. 7).

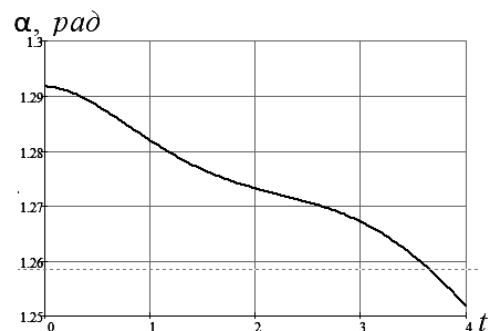


Рис 5. Графік зміни кутової координати стріли
Fig. 5. Graphs changes of angular coordinate of arrow

Із графіків (рис. 3 та рис. 6) видно, що на початку руху відбувається швидкий розгін стріли, а пізніше плавне пригальмовування. Це дозволяє точно позиціювати вантаж в момент завершення пуску (рис. 2).

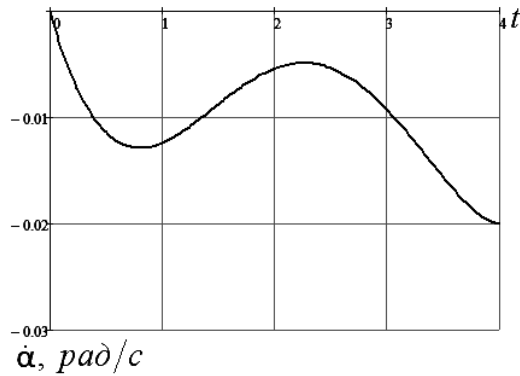


Рис. 6. Графік зміни кутової швидкості стріли
Fig. 6. Graphs change in angular velocity of arrow

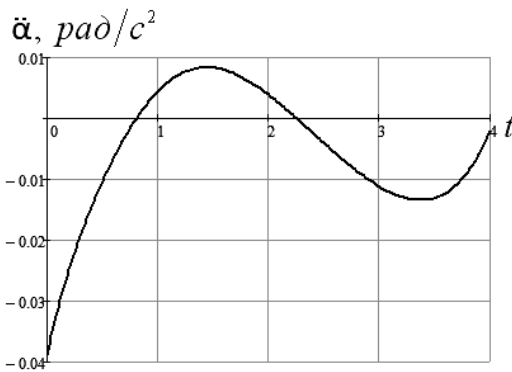


Рис. 7. Графік зміни кутового прискорення стріли

Fig. 7. Graphs changes the angular acceleration of arrow

Із графіків на рис. 8 видно, що статична складова F_C внутрішнього зусилля в рейці протягом всього часу розгону залишається майже сталою. Значення динамічної складової F_D залежить від прискорення ланок стрілової системи. Видно, що загальне внутрішнє зусилля в зубчастій рейці змінюється плавно.

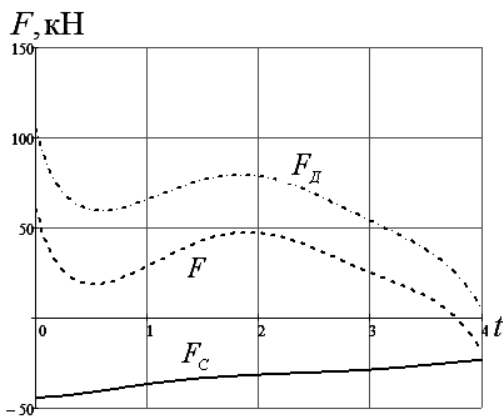


Рис. 8. Графіки зміни внутрішніх зусиль в рейці
Fig. 8. Graphs of internal change efforts of rail

ВИСНОВКИ

У роботі проведено дослідження кінематичних та силових параметрів ШЗСС під час розгону, що відбувається за законом оптимізації прискорень. Визначено рівняння руху вантажу та кінцевої точки хобота, до якої підвішений вантаж. За встановленими рівняннями проведено кінематичний та силовий аналіз стрілової системи за різної тривалості розгону.

Встановлено, що найбільш сприятливим, з точки зору забезпечення плавності руху, є тривалість розгону 4 с. Для встановленої тривалості розгону побудовано графіки зміни кінематичних параметрів вантажу, кінцевої точки хобота та стріли. При такій тривалості розгону забезпечується плавна зміна внутрішнього зусилля в зубчастій рейці приводу, що позитивно впливає на загальну динаміку руху ШЗСС крана.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Ловейкін В.С.* Вплив розгойдування вантажу на ефективність кранів із шарнірно-зчленованою стріловою системою / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук, В.В. Іщук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2012. – № 80. С. 22-29.
2. *Паламарчук Д.А.* Оптимізація режимів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана з горизонтальним переміщенням вантажу: дис. кандидата тех. наук: 05.05.05 / Паламарчук Дмитро Анатолійович. – К., 2013. – 240 с.
3. *Ловейкін В.С.* Мінімізація коливань вантажу при горизонтальному переміщенні шарнірно-зчленованою стріловою системою крана / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук // Техніка будівництва. – 2010. – №24. С. 9-17.
4. *Паламарчук Д.А.* Спосіб мінімізації коливань вантажу під час зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи крана / Д.А. Паламарчук, В.В. Іщук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2011. – №78. С. 20-27.
5. *Ловейкін В.С.* Исследование движущих сил в механизме изменения вылета стреловой системы крана / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2014. – №84. С. 39-45.

6. Яуре А.Г. Крановый электропривод : справочник / А.Г. Яуре, Е.М. Певзнер. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

REFERENCES

1. Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., Ishchuk V.V., 2012. Vlijanie raskachivaniya gruzha na jeffektivnost' kranov s sharnirno-sochlenennoj strelovoj sistemoj [Influence sway the efficiency cranes with articulated jib system]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, construction, road and melioration machines], No.80, 22-29. - (in Ukrainian)
2. Palamarchuk D.A., 2013. Optyimizacija rezhyviv ruhu sharnirno-zchlenovanoi' strilovoij systemy kрана z goryzontal'nym peremishhennjam vantazhu [Optimization of traffic hinge-articulated jib crane system with horizontal movement of cargo]. Dysertacija kandydata nauk [Dissertation Ph.D.], 240. - (in Ukrainian)
3. Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., 2010. Minimizacija kolyvan' vantazhu pry goryzontal'nomu peremishhenni sharnirno-zchlenovanoju strilovoju systemoju kрана. [Minimizing vibrations cargo movement in the horizontal hinge-Rigid boom crane system. Tehnika budivnyctva [Machinery construction], 24, 9-17. - (in Ukrainian)
4. Palamarchuk D.A., Ishchuk V.V., 2011. Spособ minimizacii kolebanij gruzha vo vremja izmenenija vyleta sharnirno-sochlenennoj strelovoj systemy kрана [Way to minimize the oscillation of the load during the luffing articulated jib crane system]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, construction, road and melioration machines], No.78, 20-27. - (in Ukrainian)
5. Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., 2014. Issledovanie dvizhushhih sil v mehanizme izmenenija vyleta strelovoj systemy kрана. [Investigation of the driving forces in the mechanism of luffing jib crane system]. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, construction, road and melioration machines], No.84, 39-45. - (in Ukrainian)
6. Jaure A.G., Pevzner E.M., 1988. Kranovyj elektroprивod: spravochnik. [Crane electric: a handbook], Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 344. - (in Russian)

