

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ РУХУ СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

Вячеслав Ловеїкін¹, Дмитро Паламарчук²¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, 03041, вул. Героїв Оборони 11, Київ, Україна,² Київський національний університет будівництва і архітектури, 03680, Повітофлотський пр-кт 31, Київ, Україна, e-mail: palamarchuk-dima@ukr.net

THE RESULTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF MOTION SYSTEM JIB GANTRY CRANES

Vyacheslav Loveykin¹, Dmytro Palamarchuk²¹ National University of Life Environmental Sciences of Ukraine, 03041, Heroyiv Oborony st., 11, Kyiv, Ukraine² Kyiv National University of Construction and Architecture, 03680, Povitoflotskyu Prospect 31, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. В статті здійснено вибір оптимального закону, що найбільш доцільний при здійсненні автоматичного керування електродвигуном механізму зміни вильоту стрілової системи, для здійснення горизонтального переміщення вантажу з мінімальними коливаннями. Проаналізовано графіки зміни горизонтальної координати центру мас вантажу та внутрішнього зусилля в зубчастій рейці, що були отримані теоретичним та експериментальним шляхом. Здійснено порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень динаміки руху стрілової системи крана МАРК-40, за умови зміни вильоту стрілової системи за оптимальним законом.

Ключові слова: коливання, виліт, стрілова система, кран, зусилля.

АННОТАЦИЯ. В статье осуществлен выбор оптимального закона, который наиболее целесообразен при осуществлении автоматического управления электродвигателем механизма изменения вылета стреловой системы, для осуществления горизонтального перемещения груза с минимальными колебаниями. Проанализированы графики изменения горизонтальной координаты центра масс груза и внутреннего усилия в зубчатой рейке, полученные теоретическим и экспериментальным путем. Осуществлено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований динамики движения стреловой системы крана МАРК-40, при изменении вылета стреловой системы за оптимальным законом.

Ключевые слова: колебания, вылет, стреловая система, кран, усилие.

SUMMARY. Purpose. The aim is to compare the results of theoretical and experimental studies of the dynamics of motion of the crane jib MARC-40. **Methodology/approach.** The results presented in the paper, obtained by theoretical and experimental. **Findings.** Determined the arithmetic mean and standard deviation between the results obtained by theoretical and experimental. **Research limitations/implications.** Through experimental studies confirmed the adequacy of theoretical statements that have been obtained previously. **Originality/value.** In this paper, theoretical and experimental ways confirmed that the use of optimal laws of motion jib system can significantly reduce the load fluctuations on flexible suspension, and thus reduce the dynamic loads on the links jib system load.

Key words: oscillations, boom, boom system, crane, effort.

Подано 01.04.2013; прийнято 24.06.2013

ВСТУП

В роботі [1] проаналізовано та систематизовано фактори негативного впливу розгойдування вантажу на ефективність кранів з шарнірно-зчленованою стріловою системою (ШЗСС). Встановлено, що найбільш згубно ці розгойдування впливають на ланки і кінематичні пари стрілової системи. Збільшення внутрішніх зусиль в ланках призводить до виникнення пружних коливань у ланках, виникнення внутрішніх жорстких ударів у шарнірних з'єднаннях ланок,

виникнення тріщин у ланках. Тому, для суттєвого зменшення коливань вантажу в кранах із ШЗСС запропоновано конструкції механізмів зміни вильоту стрілової системи [2]. Однак, ці конструкції не універсальні, тому в механізмах з електроприводом більш доцільно застосовувати системи керованого електроприводу, що побудовані на основі частотного перетворювача [3].

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ

Керування електроприводом здійснюється за раніше встановленими оптималь-

ними законами [4-6]. Порівнюючи кінематичні характеристики ШЗСС та вантажу, при оптимальному режимі руху за відхиленнями прискорень [5] та ривків [6] видно, що горизонтальна швидкість вантажу приблизно однакова за обох режимів. Однак, порівнюючи прискорення та ривок вантажу, видно, що при ривковому режимі ці параметри суттєво збільшені. Це призводить до того, що для забезпечення оптимального режиму руху за ривком, електродвигун механізму зміни вильоту повинен працювати з максимально можливою частотою обертання, що негативно відображається на його експлуатаційних показниках.

Тому, незважаючи на переваги ривкового режиму по забезпеченню крайових умов руху вантажу, більш доцільно на практиці застосовувати режим оптимізації за відхиленням прискорень.

Для оцінки впливу розгойдування вантажу на динаміку руху ШЗСС важливо дослідити зміну горизонтальної координати вантажу x (рис. 1) та внутрішнього зусилля F (рис. 2) в зубчастій рейці механізму зміни вильоту, в процесі руху стрілової системи. Ці графіки побудовані в результаті теоретичних досліджень динаміки руху ШЗСС крана МАРК-40 [7].

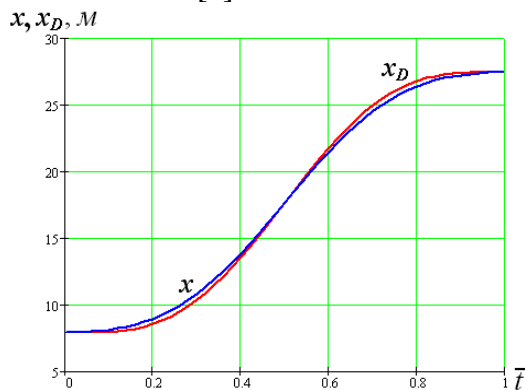


Рис. 1. Графік зміни горизонтальної координати вантажу x та кінцевої точки хобота x_D

Fig. 1. Schedule changes in the horizontal coordinates of load x and trunk endpoint x_D

Наведені графіки побудовані за умовою руху ШЗСС за оптимальним законом, що мінімізує відхилення прискорень центру мас вантажу та кінцевої точки хобота [5], під час руху від мінімального значення вильоту до максимального.

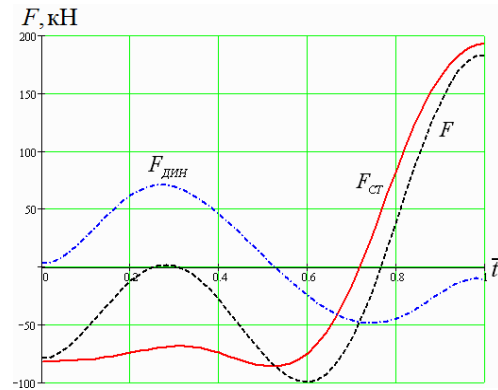


Рис. 2. Графік зміни статичного $F_{ст}$, динамічного $F_{дин}$ та повного зусилля F в зубчастій рейці

Fig. 2. Schedule changes of static $F_{ст}$, dynamic $F_{дин}$ and full effort F in dentate rail

Для перевірки адекватності теоретичних досліджень, було проведено експериментальні дослідження динаміки руху стрілової системи в процесі зміни вильоту. Експериментальні дослідження проведені на фізичній моделі ШЗСС, яка в певному масштабі відображає процес зміни вильоту стрілової системи крана МАРК-40 [8]. При цьому був використаний вимірювальний комплекс, що запропонований в роботі [9]. Дослідження проведені при горизонтальному переміщенні вантажу масою 16кг, що відповідає середній вантажопідймальності реального крана МАРК-40 – 19200 кг.

В ході експериментальних досліджень було визначено кут відхилення вантажного каната від хобота γ (рис. 3).

Тому, для дослідження зміни горизонтальної координати центру мас вантажу x в процесі зміни вильоту, використано залежність:

$$x = L \cos \alpha - l \cos \varphi_2 + H \sin \psi + R_0, \quad (1)$$

де L – довжина стріли, м; l – довжина хобота, м; H – довжина підвісу вантажу, м; R_0 – радіус кінцевого обвідного блока хобота, м; α – кутова координата стріли; φ_2 – кутова координата хобота; ψ – кут відхилення вантажного каната від вертикалі.

Кут відхилення вантажного каната від вертикалі визначається за виразом:

$$\begin{aligned} \psi &= \gamma - (\pi - \varphi_2) - 90^\circ = \\ &= \gamma - \arcsin\left(\frac{L \sin \alpha - H}{l}\right) - 90^\circ. \end{aligned} \quad (2)$$

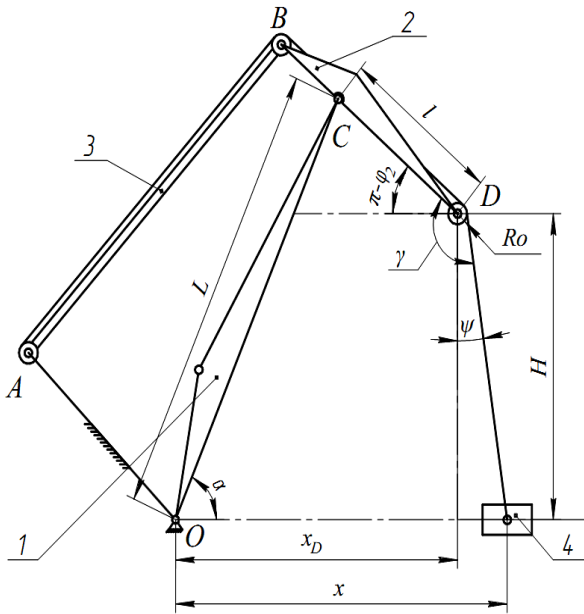


Рис. 3. Схема до визначення кута відхилення вантажного каната від вертикалі:

1 – стріла; 2 – хобот; 3 – відтяжка; 4 – вантаж

Fig. 3. Scheme to determine the angle of deviation from the vertical rope load:

1 – arrow; 2 – trunk; 3 – outhaul; 4 – load

На основі залежності (1) та масиву даних кута γ , що був отриманий експериментально, побудовано графік зміни горизонтальної координати центру мас вантажу x від часу при автоматичному керуванні електродвигуном механізму зміни вильоту стрілової системи (рис. 4).

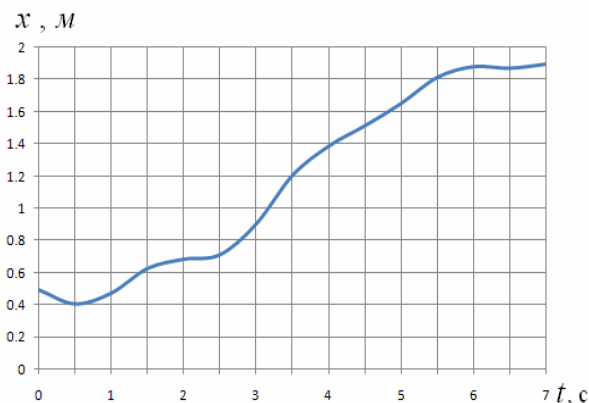


Рис. 4. Графік зміни горизонтальної координати центру мас вантажу моделі

Fig. 4. Schedule changes in the horizontal coordinates of the center of mass load model

Для оцінки впливу розгойдування вантажу на зміну внутрішніх зусиль в ланках ШЗСС, експериментальним шляхом дослі-

джено зміну внутрішнього поздовжнього зусилля F в зубчастій рейці (рис. 5).

Для порівняння теоретичних та експериментальних досліджень динаміки руху стрілової системи крана МАРК-40, потрібно визначити зміну горизонтальної координати вантажу та внутрішнього зусилля в зубчастій рейці, що відбувається в реальній стріловій системі крана.

Експериментальний графік зміни горизонтальної координати центру мас вантажу для реального крана побудовано з урахуванням графіка зміни горизонтальної координати центру мас вантажу моделі (рис. 4) та коефіцієнта подібності лінійних розмірів реального крана і його моделі, що був визначений в роботі [8], і становить $\lambda_y = 16$.

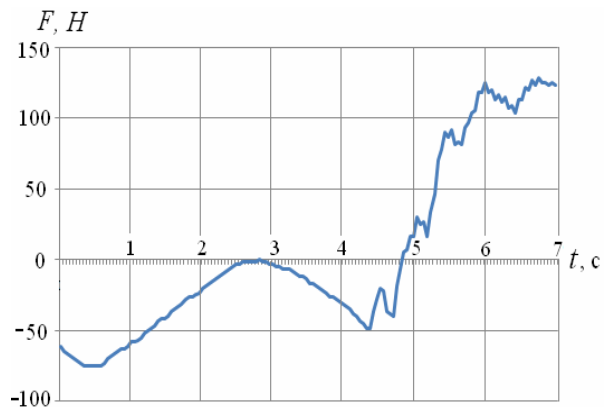


Рис. 5. Графік зміни внутрішнього зусилля в зубчастій рейці моделі

Fig. 5. Schedule changes of internal forces in dentate rail model

На рис. 6 приведено графік зміни горизонтальної координати центру мас вантажу реального крана, що був отриманий в результаті вказаних перетворень.

Експериментальний графік зміни зусилля в зубчастій рейці F при автоматичному керуванні для реального крана побудовано з урахуванням графіка зміни внутрішнього зусилля в рейці моделі (рис. 5) та коефіцієнта подібності мас реального крана і його моделі $\lambda_m = 1200$, що був визначений в роботі [8].

Графік, отриманий в результаті наведених перетворень, приведено на рис. 7.

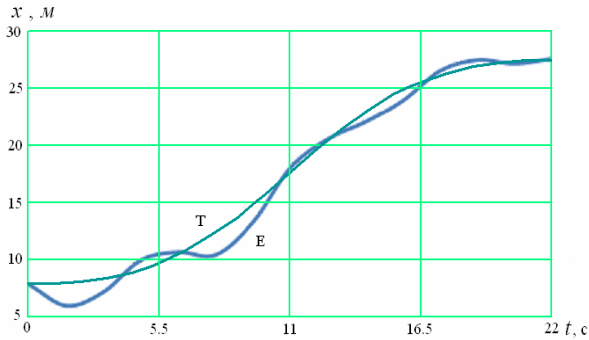


Рис. 6. Графік зміни горизонтальної координати центру мас вантажу реального крана: T – теоретичний; E - експериментальний

Fig. 6. Schedule changes in the horizontal coordinates of the center of mass of the real load crane: T - theoretical, E - experimental



Рис. 7. Графік зміни зусилля в зубчастій рейці реального крана: T – теоретичний; E - експериментальний

Fig. 7. Schedule change efforts in dentate real crane rail: T - theoretical, E - experimental

Деякі стрибки зусиль можна пояснити низькою точністю виготовлення шарніра «зубчаста рейка – стріла», а також відсутністю демперних пристроїв у моделі, які б зменшували поштовхи від стріли до рейки.

Для зручності аналізу результати теоретичних та експериментальних досліджень зведені в табл. 1.

Для відображення різниці між результатами теоретичних та експериментальних досліджень визначено середнє арифметичне відносної похибки вимірів за весь час зміни вильоту.

Середнє арифметичне відносної похибки вимірів визначалося для кожного з досліджуваних параметрів за допомогою виразу:

$$\Delta f = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \Delta f_i \right|}{n} 100\%, \quad (3)$$

де Δf_i – відносна похибка між теоретичним та експериментальним значенням параметра, що визначена в будь-який момент часу; $n=20$ – кількість вимірів.

Середнє арифметичне відносної похибки між теоретичним та експериментальним результатом становить:

- для горизонтальної координати вантажу $\Delta x=4,71\%$;
- для поздовжнього зусилля в зубчастій рейці $\Delta F=28,98\%$.

Для більш повного аналізу отриманих

Таблиця 1. Порівняльна таблиця результатів теоретичних та експериментальних досліджень реальної стрілової системи при автоматичному керуванні

Table 1. The comparative table the results of theoretical and experimental studies of real jib system with automatic control

Досліджуваний параметр	Метод дослідження	Час руху t, c								
		0	2,75	5,5	8,25	11	13,75	16,5	19,25	22
Горизонтальна координата вантажу x, m	T	7,9	8,05	9,2	12,8	17,7	22,56	26	27,39	27,5
	E	7,9	7,03	10,5	12,6	19,27	23,1	26	27,9	27,5
Зусилля в зубчастій рейці $F, кН$	T	78,6	35	1	20	76	92,8	25,22	126	183,1
	E	74,04	66,04	34,02	8,3	20,04	57,02	28,02	150,1	148,09

даних визначимо середньоквадратичне відхилення між результатами теоретичних та експериментальних досліджень протягом всього часу роботи механізму.

Оскільки вибірка мала за розмірністю, то скористаємося виразом середньоквадратичного відхилення із поправкою Бесселя [10]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

де n – розмір вибірки; x_i – i - тий елемент вибірки; \bar{x} – середнє арифметичне вибірки.

Використовуючи дані табл. 1, визначені середньоквадратичні відхилення досліджуваних параметрів:

– середньоквадратичне відхилення горизонтальної координати вантажу $s_x = 0,782 м$;

– середньоквадратичне відхилення позовжнього зусилля в зубчастій рейці $s_F = 21,726 кН$.

ВИСНОВКИ

В роботі теоретичним та експериментальним шляхами підтверджено, що застосування частотного керування електродвигуном механізму зміни вильоту ШЗСС за встановленими оптимальними законами дозволяє суттєво зменшити коливання вантажу на гнучкому підвісі, а відповідно, і зменшити динамічні навантаження на ланки стрілової системи.

Здійснено порівняння результатів, отриманих теоретичним та експериментальним шляхом і виявлено, що середнє арифметичне відхилення між значеннями горизонтальної координати вантажу не перевищує 4,71%, а середнє арифметичне відхилення зусилля в приводній рейці не перевищує 28,98%. Ці значення знаходяться в межах допустимих відхилень, що прийняті для інженерних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Ловейкін В.С.** Вплив розгойдування вантажу на ефективність кранів із шарнірно-зчленованою стріловою системою / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук, В.В. Ішук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2012. – №80. С. 22-29.

2. **Ловейкін В.С.** Конструкції механізмів зміни вильоту стрілової системи, що забезпечують оптимальний рух вантажу / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук // Бъдешето въпроси от света на науката - 2012. – 2012. – №39. С. 38-42.
3. **Ромасевич Ю.О.** Оптимізація перехідних режимів руху вантажного візка прольотних кранів : дис. на здобуття наук. ступеню кандидата техн. наук : 05.05.05 / Ромасевич Юрій Олександрович. – К., 2010. – 210 с.
4. **Ловейкін В.С.** Оптимізація режиму зміни вильоту шарнірно-зчленованої врівноваженої стрілової системи крана / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2008. – №72. С. 21-27.
5. **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.
6. **Паламарчук Д.А.** Мінімізація коливань вантажу при горизонтальному переміщенні шарнірно-зчленованою стріловою системою крана / Д.А. Паламарчук, В.В.Ішук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2011. – №78. С. 20-27.
7. **Святославский А.** Украинские «Марки» для украинских портов / А. Святославский // Транспорт. – 2004. – №22. – С. 11–15.
8. **Ловейкін В.С.** Створення фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи крана / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук, І.А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2010. – №75. С. 25-32.
9. **Ловейкін В.С.** Експериментальне дослідження руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана при зміні вильоту вантажу / В.С. Ловейкін, Д.А. Паламарчук, В.В. Ішук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2011. – №77. С. 38-43.
10. **Красовский Г.И.** Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов – М. : Изд-во БГУ, 1982. – 112с.

REFERENCES

1. **Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., Ishhuk V.V., 2012.** Vplyv rozgojduvannja vantazhu na efektyvnist' kraniv iz sharnirno-zchlenovanoju strilovuju systemoju [Effect of oscillation of the load on the efficiency of the crane jib hinged-

- rigid system]. *Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* [Mining, constructional, road and melioration machines], no. 80, 22-29.
2. **Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., 2012.** Konstrukcii' mehanizmiv zminy vyl'otu strilovoi' systemy, shho zabezpechujut' optimal'nyj ruh vantazhu [Structures, mechanisms of change departure jib systems that provide optimal cargo movement]. *Въдeshheto въпросы ot sveta na naukata – 2012* [Future issues of the world of science – 2012], no. 39, 38-42.
 3. **Romasevych Ju.O., 2010.** Optyimizacija perehidnyh rezhymiv ruhu vantazhnogo vizka prol'otnyh kraniv : dys. kandydata tehn. nauk [Optimization of transient movement of trolley span cranes. Candidate tech. science dis.]. Kyiv, 210.
 4. **Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., 2008.** Optyimizacija rezhymu zminy vyl'otu sharnirno-zchlenovanoi' vrvnovazhenoi' strilovoi' systemy kрана [Optimization regime change departure hinged-articulated a balanced jib crane system]. *Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* [Mining, constructional, road and melioration machines], no. 72. 21-27.
 5. **Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., 2010.** Minimizacija kolyvan' vantazhu pry goryzontal'nomu peremishhenni sharnirno-zchlenovanoju strilovoju systemoju kрана [Minimizing vibration load in the horizontal movement of hinged-rigid jib crane system]. *Tehnika budivnyctva* [Technics of construction], no.24. 9-17.
 6. **Palamarchuk D.A., Ishhuk V.V., 2011.** Minimizacija kolyvan' vantazhu pry goryzontal'nomu peremishhenni sharnirno-zchlenovanoju strilovoju systemoju kрана [Minimizing oscillations load in the horizontal movement of hinged-rigid jib crane system]. *Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* [Mining, constructional, road and melioration machines], no. 78. 20-27.
 7. **Svjatoslavskij A., 2004.** Ukraynskye «Marky» dlja ukrajnskyh portov [Ukrainian "Marks" for the Ukrainian ports]. *Transport* [Transport], no. 22. 11–15.
 8. **Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., Palamarchuk I.A., 2010.** Stvorenja fizychnoi' modeli sharnirno-zchlenovanoi' strilovoi' systemy kрана [Create a physical model of hinged-articulated jib crane system]. *Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* [Mining, constructional, road and melioration machines], no. 75. 25-32.
 9. **Lovejkin V.S., Palamarchuk D.A., Ishhuk V.V., 2011.** Eksperymental'ne doslidzhennja ruhu sharnirno-zchlenovanoi' strilovoi' systemy kрана pry zmini vyl'otu vantazhu [Experimental study of motion hinged-articulated jib crane system by changing the departure load]. *Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* [Mining, constructional, road and melioration machines], no. 77. 38-43.
 10. **Krasovskij G.Y., Fylaretov G.F., 1982.** Planyrovanye eksperymenta [Planning the experiment]. Moscow, 112.