

ISSN 2663-1334 (print)  
ISSN 2663-1342 (online)

<http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.04>

# Machinery & Energetics

*Journal of Rural Production Research*

since 2010 till 2018

[Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science  
of Ukraine. Series: Technique and Energy of APK.  
ISSN 2222-8594 (print). ISSN 2415-7694 (online)]

## Vol. 11

## № 4

(October – December)

**Kyiv – 2020**

**Editor-in-Chief**

*Prof. Vyatseslav Loveykin, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

**Vice-Editor**

*PhD Oleksandr Synyavskiy, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*PhD Ivan Rogovskii, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

**Assistants Editor**

*PhD Viktoriya Kyrylyuk, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

**Editorial Board**

*Prof. Andrey Tevyashev, Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine*

*Prof. Andriy Boyko, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Andrzej Marczuk, University of Life Sciences in Lublin, Poland*

*Prof. Dainis Viesturs, Latvia University of Agriculture, Latvia*

*Prof. Dmytro Voytiuk, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Gennadiy Golub, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Georgiy Tayanowski, University of Agriculture in Minsk, Bielarus*

*Prof. Henryk Sobczuk, Polish Academy of Sciences, Poland*

*Prof. Janusz Wojdalski, Warsaw University of Life, Poland*

*Prof. Larysa Bal-Prylypko, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Leonid Aniskevych, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Ludvikas Spokas, Agrarian University in Kaunas, Lithuania*

*Prof. Natalia Kosuhina, Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko, Ukraine*

*Prof. Ondrej Savec, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic*

*Prof. Petro Yevych, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic*

*Prof. Povilas A. Sirvydas, Agrarian University in Kaunas, Lithuania*

*Prof. Stanislaw Sosnowski, University of Engineering and Economics in Rzeszów, Poland*

*Prof. Tadeusz Złoto, Częstochowa University of Technology, Poland*

*Prof. Valeriy Fedoreiko, Ternopil National Pedagogical University, Ukraine*

*Prof. Valeriy Voytiuk, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Valery Adamchuk, National Scientific Centre «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture» in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Vitaliy Lysenko, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Vjacheslav Shebanin, Mykolayiv National Agrarian University, Ukraine*

*Prof. Volodymyr Boyko, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Volodymyr Bulgakov, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Volodymyr Gorobets, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Volodymyr Gorobetz, National Agrarian University of Moldova, Moldova Republic*

*Prof. Volodymyr Kozyrskii, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Volodymyr Kravchuk, State Scientific Organization „Leonid Pogorilyy Ukrainian Scientific Research Institute of Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production”, Ukraine*

*Prof. Vyatcheslav Adamchuk, University McGill, Canada*

*Prof. Waclaw Romaniuk, Institute of Technology and Life Sciences Branch in Warsaw, Poland*

*Prof. Wojciech Tanaś, University of Life Sciences in Lublin, Poland*

*Prof. Yevgen Aftandilyants, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine*

*Prof. Yuriy Jatskevich, University of British Columbia in Vancouver, Canada*

All the articles are available on the webpage: [www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica](http://www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica)

All the scientific articles received positive evaluations by independent reviewers

Linguistic consultant: *Ivan Rogovskii*

Typeset: *Ivan Rogovskii*

Cover design: *Liudmyla Titova*

Photo on the cover: *Ivan Rogovskii*

© Copyright by National University of Life and Environmental Science of Ukraine, 2020

**Editorial Office address**

National University of Life and Environmental Science of Ukraine

Str. Heroiv Oborony, 15, Kyiv, Ukraine, 03041

e-mail: [rogovskii@nubip.edu.ua](mailto:rogovskii@nubip.edu.ua)

**Printing**

AgroMediaGroup, Novokonstantinivska Str. 4a, 04-080 Kyiv, Ukraine

**Publishing Office address**

AgroMediaGroup, Novokonstantinivska Str. 4a, 04-080 Kyiv, Ukraine

ISSN 2663-1334 (print)

ISSN 2663-1342 (online)

Edition 100+16 vol.

ISSN 2663-1334 (print)  
ISSN 2663-1342 (online)

<http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.04>

# Техніка та енергетика

*Журнал наукових досліджень  
сільськогосподарського виробництва*

з 2010 року до 2018 року

[Науковий вісник Національного університету біоресурсів і  
природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК  
ISSN 2222-8594 (print). ISSN 2415-7694 (online)]

## Випуск 11

### № 4

(жовтень – грудень)

**Київ – 2020**

## Національний університет біоресурсів і природокористування України

Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Редкол. : В. С. Ловейкін (голов. ред.) та ін. Київ. 2020. Вип. 11. № 4. 182 с.

Висвітлено результати наукових досліджень, проведених працівниками Національного університету біоресурсів і природокористування України і в співпраці із закордонними науковцями, працівниками навчальних закладів Міністерства освіти і науки України та науково-дослідних інститутів НАН України, НААН України і Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України.

**Редакційна колегія:** В. С. Ловейкін, д-р техн. наук, проф. (головний редактор); О. Ю. Синявський, канд. техн. наук, доц. (заступник головного редактора); І. Л. Роговський, канд. техн. наук, старший наук. співр. (заступник головного редактора); В. І. Кирилюк, канд. с.-г. наук, доц. (відповідальний секретар); В. І. Адамчук, д-р техн. наук, проф.; В. В. Адамчук, д-р техн. наук, проф.; Л. В. Аніскевич, д-р техн. наук, проф.; Є. Г. Афтанділянц, д-р техн. наук, проф.; Л. В. Баль-Прилипка, д-р техн. наук, проф.; В. М. Булгаков, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Войтюк, д-р техн. наук, проф.; І. В. Головач, д-р техн. наук, проф.; Г. А. Голуб, д-р техн. наук, проф.; М. В. Гребченко, д-р техн. наук, проф.; А. В. Жильцов, д-р техн. наук, проф.; М. М. Заблудський, д-р техн. наук, проф.; Н. А. Заєць, д-р. техн. наук, доц.; В. В. Каплун, д-р техн. наук, проф.; В. В. Коваль, д-р техн. наук, проф.; В. В. Козирський, д-р техн. наук, проф.; Н. Г. Косуліна, д-р техн. наук, проф.; В. П. Лисенко, д-р техн. наук, проф.; К. Г. Лопатько, д-р техн. наук, доц.; І. І. Назаренко, д-р техн. наук, проф.; В. М. Несвідомін, д-р техн. наук, проф.; С. Ф. Пилипака, д-р техн. наук, проф.; В. М. Решетюк, канд. техн. наук, доц.; В. Романюк, д-р техн. наук, проф.; Г. Собчук, д-р техн. наук, проф.; О. Б. Таширев, д-р техн. наук, проф.; В. С. Федорейко, д-р техн. наук, проф.; С. П. Циганков, д-р техн. наук, старший наук. співр.; М. Г. Чаусов, д-р техн. наук, проф.; С. А. Шворов, д-р техн. наук, проф.; Ю. Яцкевич, д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку Вченою радою НУБіП України, протокол № 3 від 28 жовтня 2020 р.

Науковий журнал «Machinery & Energetics» на підставі наказу Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (додаток № 1) внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б» у галузі технічних наук з спеціальностей 131 і 133), який є правонаступником наукового видання «Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК», який згідно з наказами Міністерства освіти і науки України від 13 липня 2015 р. № 747 та від 07 травня 2019 р. № 612 внесений до переліку наукових друкованих фахових видань України, в яких можуть бути опубліковані результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступеней доктора і кандидата технічних наук.

Науковий журнал «Machinery & Energetics» внесено до бібліографічної бази даних наукових публікацій внесено до бібліографічних баз даних наукових публікацій CrossRef, РІНЦ, Ulrich's Periodicals Directory, USJ, BASE, SIS, AGRIS, індексується Google Scholar, RePEc, ResearchBib, MIAR.

Відповідальний за випуск І. Л. Роговський.

Адреса редколегії: 03041, Київ-41, вул. Героїв оборони, 15,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України, тел. 527-82-41

© Національний університет біоресурсів і  
природокористування України, 2020

УДК 621.873

## АНАЛІЗ ПУСКУ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЇ СТРІЛОВОЇ СИСТЕМИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМУ РИВКОВОМУ РЕЖИМІ РУХУ

В. С. Ловейкін<sup>1</sup>, Д. А. Паламарчук<sup>2</sup>, Ю. О. Ромасевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна.

*Стаття зі спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.*

*Кореспонденція авторів: lovvs@ukr.net.*

*Історія статті: отримано – червень 2020, акцептовано – жовтень 2020.*

*Бібл. 12, рис. 8, табл. 1.*

**Анотація.** У даній статті представлено результати аналітичного дослідження кінематичних та силових характеристик руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана на початку руху. Дослідження проведено під час розгону електродвигуна механізму зміни вильоту зі стану спокою до частоти обертання, що відповідає номінальній робочій швидкості переміщення вантажу. При цьому пуск електродвигуна відбувається при умові руху всієї стрілової системи разом з вантажем за законом оптимізації ривків.

Використання вказаного закону дозволяє повністю згладити розгойдування вантажу на початку руху. Крім того, під кінець розгону забезпечуються однакові швидкості та прискорення між кінцевою точкою хобота крана та вантажем. Це дозволяє забезпечити високу плавність руху стрілової системи та уникнути розгойдувань вантажу після виходу ротора електродвигуна на номінальну частоту обертання.

Також проведено дослідження статичного, динамічного та повного зусилля в зубчастій рейці приводу.

Вказані дослідження проведено при різній тривалості процесу пуску електродвигуна за законом оптимізації ривків. Це дозволило встановити залежність досліджуваних кінематичних та силових параметрів від тривалості перехідного процесу. На основі цього розроблено рекомендації щодо вибору тривалості розгону електродвигуна механізму зміни вильоту.

У ході дослідження побудовано графіки зміни досліджуваних параметрів стрілової системи в часі. Графічні залежності отримані при найбільш прийнятній тривалості режиму розгону з точки зору зменшення динамічних навантажень на ланки стрілової системи, покращення технологічного процесу роботи крана та його ергономіки.

**Ключові слова:** шарнірно-зчленована стрілова система, механізм зміни вильоту, оптимальне керування, розгойдування вантажу, зусилля.

### Постановка проблеми

Під час зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи (ШЗСС) крана виникають розгойдування вантажу на канатному підвісі. Максимальні відхилення канату від вертикалі спостерігаються під час руху стрілової системи на перехідних режимах і досягають значення 10...12°. Це явище негативно впливає на техніко-економічні та ергономічні показники кранів з ШЗСС.

Зокрема, розгойдування вантажу викликають втомлене руйнування елементів металоконструкцій стрілової системи та призводять до збільшення динамічних навантажень на елементи рейкового механізму зміни вильоту. Це нерідко призводить до їх поломки, які, в свою чергу, є причинами простоювання та дорогих ремонтів всього крану. Крім того, розгойдування вантажу стає причиною утруднення його точного позиціонування, що призводить до зниження продуктивності роботи крана та ускладнення умов роботи стропальників і такелажників, а також змушує кранівника-оператора весь час працювати у психологічному напруженні.

Крім того, на практиці при проведенні перевантажувальних робіт досить рідко виникає така ситуація, коли переміщення вантажу здійснюється від мінімального вильоту до максимального. Здебільшого переміщення вантажу краном здійснюється на певну відстань, що становить трохи більше половини від максимально можливого технічного вильоту. В зв'язку з цим, доцільно провести дослідження руху стрілової системи за законом, який відповідає оптимізації ривків лише на ділянці пуску.

### Аналіз останніх досліджень

У роботі [1] проведено дослідження руху стрілової системи під час пуску за законом, який відповідає оптимізації за критерієм середньоквадратичних значень прискорень. Встановлено кінематичні та силові характеристики

ШЗСС за різної тривалості цього перехідного режиму руху.

У монографії [2] проведено дослідження руху стрілової системи за різних законів, які відповідають оптимізації за критеріями середньоквадратичних значень кінематичних характеристик, таких як переміщення, швидкість, прискорення та ривок. Встановлено можливість практичного використання наведених режимів руху. Однак, вказані дослідження проведені при переміщенні вантажу на повний виліт.

У статті [3] розглядається питання оптимізації навантажень на ланки стрілової системи з метою зниження енергоспоживання електродвигуна механізму зміни вильоту. Однак, вказаний спосіб не повністю розкриває причини виникнення та зміну динамічних навантажень під час перехідних режимів руху ШЗСС крана.

У роботі [4] запропоновано зменшити енергоємність крана з ШЗСС при проведенні перевантажувальних робіт у портах за рахунок зміни конфігурації стрілової системи та перерозподілу силових навантажень на ланки стрілової системи та кран в цілому. Недоліком такого підходу є те, що запропоновані рішення можуть бути використані лише при проектуванні нових кранів.

Під час аналізу роботи [5] виявлено нові ґрунтовні підходи щодо експериментальних досліджень динаміки руху кранів з різними стріловими системами. Тут запропоновано системи керування механізмами кранів, що працюють у режимі реального часу.

Таким чином, виявлено різні підходи, щодо покращення динамічних характеристик руху стрілових систем, а, відповідно, і зменшення енергетичних витрат технологічного процесу транспортування вантажу під час роботи крана.

### Мета досліджень

Мета дослідження полягає у отриманні рекомендацій щодо можливості практичного застосування закону руху стрілової системи знайденого в результаті оптимізації за критерієм середньоквадратичних значень ривків під час пуску електродвигуна механізму зміни вильоту.

### Результати досліджень

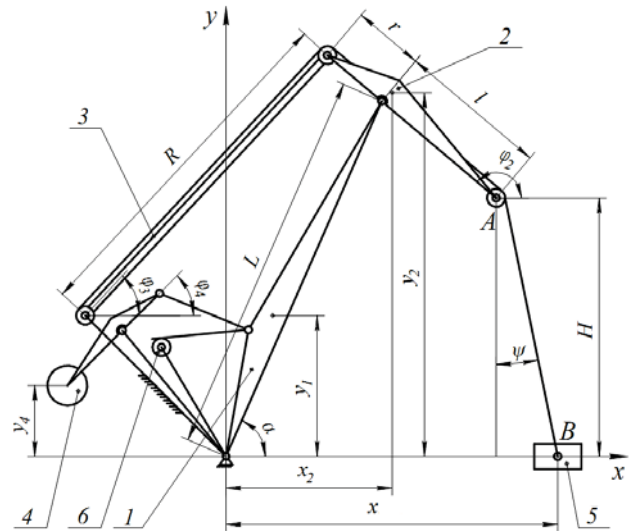
Раніше встановлено [2], що режим руху стрілової системи, який забезпечує мінімальну різницю між ривками кінцевої точки хобота  $A$  і центром мас вантажу  $B$  (рис. 1), визначається наступною умовою

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

де  $\ddot{x}$  – горизонтальна складова ривка вантажу;  $\ddot{x}_A$  – горизонтальна складова ривка кінцевої точки хобота;  $n$  – кількість положень стрілової системи в процесі зміни вильоту.

На рис. 1 використано наступні позначення геометричних характеристик стрілової системи:

$y_1, y_2, y_4$  – вертикальні координати центрів мас відповідно стріли, хобота та рухомої протизваги;  $x_2, x$  – горизонтальні координати центрів мас відповідно хобота і вантажу;  $\alpha$  – кутова координата повороту стріли;  $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – кутові координати повороту відповідно хобота, відтяжки та коромисла протизваги;  $L$  – довжина стріли;  $l$  – довжина хобота;  $r$  – довжина контрхобота;  $R$  – довжина відтяжки;  $H$  – довжина підвісу вантажу;  $\psi$  – кутова координата відхилення вантажного канату від вертикалі.



**Рис. 1.** Схема шарнірно-зчленованої стрілової системи з рейковим механізмом зміни вильоту: 1 – стріла; 2 – прямолінійний хобот; 3 – відтяжка; 4 – протизвага; 5 – вантаж; 6 – привідна шестерня.

**Fig. 1.** Horse-head jib system with raked luffing mechanism: 1 – main jib; 2 – straight jib; 3 – tieback; 4 – movable counterweight; 5 – cargo; 6 – the driving gear.

Для математичного маятника, що має рухому точку закріплення з довжиною підвісу  $H$ , є справедливими такі співвідношення [2]:

$$\begin{aligned} x_A &= x + \frac{H}{g} \ddot{x}; \dot{x}_A = \dot{x} + \frac{H}{g} \ddot{x}; \\ \ddot{x}_A &= \ddot{x} + \frac{H}{g} \overset{IV}{x}; \overset{V}{\ddot{x}}_A = \overset{V}{\ddot{x}} + \frac{H}{g} \overset{V}{x}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $x_A, \dot{x}_A, \ddot{x}_A$  – кінематичні характеристики кінцевої точки хобота  $A$ , відповідно горизонтальна координата, швидкість та прискорення;  $x, \dot{x}, \ddot{x}, \overset{IV}{x}, \overset{V}{x}$  – кінематичні характеристики центру мас вантажу, відповідно горизонтальна координата, швидкість, прискорення, ривок та четверта і п'ята похідні від координати.

Умова мінімізації середньоквадратичної різниці ривків забезпечується інтегральним функціоналом, який відображає суму квадратів відхилення ривків на всій ділянці перехідного процесу

$$\Delta \ddot{x}^2 = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} (\ddot{x} - \overset{IV}{\ddot{x}}_A)^2 dt = \frac{H^2}{g^2} \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \overset{V}{x}^2 dt, \quad (3)$$

де  $t_1$  – тривалість перехідного режиму руху стрілової системи.

Підінтегральний вираз цього функціоналу відображає кінематичні співвідношення між горизонтальними координатами вантажу  $x$  і кінцевої точки хобота  $x_A$  та висотою підвісу вантажу  $H$ . Вказаний функціонал записано для ШЗСС сучасного порталного крана МАРК-40, що має такі технічні параметри:

- мінімальний виліт  $S_{min} = 7,4$  м;
- максимальний виліт  $S_{max} = 30$  м;
- номінальна швидкість горизонтального переміщення вантажу  $V = 1,05$  м/с;
- час зміни вильоту від мінімального до максимального  $t = 22$  с;
- довжина стріли  $L = 25,76$  м;
- довжина хобота  $l = 10,16$  м;
- довжина підвісу вантажу  $H = 14,7$  м;
- маса стріли  $m_1 = 12650$  кг;
- маса хобота (в зборі разом з контрхоботом)  $m_2 = 5423$  кг;
- маса відтяжки  $m_3 = 3114$  кг;
- маса противаги  $m_4 = 13525$  кг;
- середня вантажопідйомність крана на основному гаку  $m = 20000$  кг.

Крани такого типу виготовляються спільно Фінляндією та Україною і відповідають всім сучасним вимогам українського та європейського законодавства щодо безпеки, ергономіки та енергозбереження.

Функціонал (3) досягає мінімуму при функціях, які є розв'язком рівняння Ейлера-Пуассона і мають вигляд

$$\frac{\partial x^2}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial x^2}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial x^2}{\partial \ddot{x}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial x^2}{\partial \ddot{x}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial x^2}{\partial x} - \frac{d^5}{dt^5} \frac{\partial x^2}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Приведене рівняння зводиться до диференціального рівняння десятого порядку виду

$$x = 0. \quad (5)$$

Після інтегрування цього рівняння за часом, отримано систему з десяти рівнянь:

$$x = D_1; \quad x = D_1 t + D_2; \quad x = \frac{1}{2} D_1 t^2 + D_2 t + D_3;$$

$$x = \frac{1}{6} D_1 t^3 + \frac{1}{2} D_2 t^2 + D_3 t + D_4;$$

$$x = \frac{1}{24} D_1 t^4 + \frac{1}{6} D_2 t^3 + \frac{1}{2} D_3 t^2 + D_4 t + D_5;$$

$$x = \frac{1}{120} D_1 t^5 + \frac{1}{24} D_2 t^4 + \frac{1}{6} D_3 t^3 + \frac{1}{2} D_4 t^2 + D_5 t + D_6;$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{720} D_1 t^6 + \frac{1}{120} D_2 t^5 + \frac{1}{24} D_3 t^4 + \frac{1}{6} D_4 t^3 +$$

$$+ \frac{1}{2} D_5 t^2 + D_6 t + D_7;$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{5040} D_1 t^7 + \frac{1}{720} D_2 t^6 + \frac{1}{120} D_3 t^5 + \frac{1}{24} D_4 t^4 + \frac{1}{6} D_5 t^3 + \frac{1}{2} D_6 t^2 + D_7 t + D_8;$$

$$\dot{x} = \frac{1}{40320} D_1 t^8 + \frac{1}{5040} D_2 t^7 + \frac{1}{720} D_3 t^6 + \frac{1}{120} D_4 t^5 + \frac{1}{24} D_5 t^4 + \frac{1}{6} D_6 t^3 + \frac{1}{2} D_7 t^2 + D_8 t + D_9;$$

$$x = \frac{1}{362880} D_1 t^9 + \frac{1}{40320} D_2 t^8 + \frac{1}{5040} D_3 t^7 + \frac{1}{720} D_4 t^6 + \frac{1}{120} D_5 t^5 + \frac{1}{24} D_6 t^4 + \frac{1}{6} D_7 t^3 + \frac{1}{2} D_8 t^2 + D_9 t + D_{10}, \quad (6)$$

де  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9, D_{10}$  – постійні інтегрування, які визначаються за крайовими умовами руху.

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

$$t = 0, x = x_0, \dot{x} = \ddot{x} = \ddot{\ddot{x}} = x = 0;$$

$$t = t_1, \dot{x} = v, \ddot{x} = \ddot{\ddot{x}} = x = x = 0, \quad (7)$$

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.

При вказаних крайових умовах постійні інтегрування набувають таких значень:

$$D_1 = \frac{1411200v}{t_1^8}; \quad D_2 = \frac{-604800v}{t_1^7}; \quad D_3 = \frac{100800v}{t_1^6};$$

$$D_4 = \frac{-26880v}{t_1^5}; \quad D_5 = \frac{1680v}{t_1^4};$$

$$D_6 = D_7 = D_8 = D_9 = 0; \quad D_{10} = x_0. \quad (8)$$

Підставивши отримані постійні інтегрування у систему (6), визначимо такий режим руху вантажу, що забезпечує мінімальне середньоквадратичне відхилення між ривком вантажу та ривком кінцевої точки хобота на ділянці розгону стрілової системи:

$$x = \rho + x_0 + \frac{35vt^9}{9t_1^8} - \frac{20vt^8}{t_1^7} + \frac{40vt^7}{t_1^6} - \frac{112vt^6}{3t_1^5} + \frac{14vt^5}{t_1^4};$$

$$\dot{x} = \frac{35vt^8}{t_1^8} - \frac{160vt^7}{t_1^7} + \frac{280vt^6}{t_1^6} - \frac{224vt^5}{t_1^5} + \frac{70vt^4}{t_1^4};$$

$$\ddot{x} = \frac{280vt^7}{t_1^8} - \frac{1120vt^6}{t_1^7} + \frac{1680vt^5}{t_1^6} - \frac{1120vt^4}{t_1^5} + \frac{280vt^3}{t_1^4};$$

$$\ddot{\ddot{x}} = \frac{1960vt^6}{t_1^8} - \frac{6720vt^5}{t_1^7} + \frac{8400vt^4}{t_1^6} - \frac{44800vt^3}{t_1^5} + \frac{840vt^2}{t_1^4};$$

$$x = \frac{11760vt^5}{t_1^8} - \frac{33600vt^4}{t_1^7} + \frac{33600vt^3}{t_1^6} - \frac{13440vt^2}{t_1^5} + \frac{1680vt}{t_1^4};$$

$$x = \frac{58800vt^4}{t_1^8} - \frac{134400vt^3}{t_1^7} + \frac{100800vt^2}{t_1^6} - \frac{26880vt}{t_1^5} + \frac{1680v}{t_1^4};$$

$$x = \frac{235200vt^3}{t_1^8} - \frac{403200vt^2}{t_1^7} + \frac{201600vt}{t_1^6} - \frac{26880v}{t_1^5}. \quad (9)$$

Підставивши, визначені за допомогою рівнянь (9), кінематичні характеристики вантажу у систему (2), визначимо кінематичні характеристики руху кінцевої точки хобота.

При цьому кутова координата нахилу стріли до горизонту визначається з наступного виразу

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

де  $z$  – є розв'язком повного квадратного рівняння, що характеризує кінематичні залежності між окремими ланками ШЗСС крана та стрілою. Визначення параметру  $z$  в повному обсязі наведено в роботі [2].

Кутова швидкість стріли в будь-який момент часу розгону ШЗСС визначається за виразом

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

де  $\dot{z}$  – параметр  $z$  з виразу (10), що продиференційований за часом [2].

Кутове прискорення стріли має вигляд

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

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

Однією з найбільш навантажених ланок приводу механізму зміни вильоту ШЗСС крана є зубчаста рейка приводного механізму 6 (рис. 1). Тому доцільно дослідити зміну внутрішнього зусилля в ній під час руху на ділянці розгону. Повне внутрішнє зусилля в зубчастій рейці знаходиться за такою залежністю

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

де  $F_C, F_D$  – відповідно статична та динамічна складові внутрішнього зусилля в рейці. Повні вирази для знаходження  $F_C$  та  $F_D$  наведено в роботах [2, 6].

Використовуючи залежності (9),..., (13), було проведено дослідження кінематичних та силових характеристик ШЗСС крана за законом, який відповідає мінімізації критерію, що відображає середньоквадратичне значення ривків під час руху на ділянці пуску.

Під час аналізу отриманих залежностей кінематичних характеристик стрілової системи було зафіксовано мінімальні та максимальні значення наступних характеристик:  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  – відповідно горизонтальна координата, швидкість та прискорення вантажу;  $x_A, \dot{x}_A, \ddot{x}_A$  – відповідно горизонтальна координата, швидкість та прискорення кінцевої точки хобота;  $\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$  – відповідно кутів координата, швидкість та прискорення стріли;  $F_C, F_D, F$  – відповідно статичне, динамічне та повне зусилля в зубчастій рейці.

Аналітичні дослідження руху проводились при різній тривалості розгону стрілової системи до усталеної швидкості. Було обрано тривалість розгону в межах 3...5 с, що відповідає вимогам та рекомендаціям

до електродвигунів кранового типу та їхніх систем керування [7, 8].

Вказані характеристики було обрано з огляду на те, що вони у найбільш повному обсязі відображають картину кінематики та динаміки руху стрілової системи та вантажу на канатному підвісі [9, 10]. Отримані розрахункові дані дослідження зведено до табл. 1 з кроком часу 0,5 с.

Аналізуючи отримані результати дослідження, встановлено, що тривалість розгону  $t_1 = 3$  с бажано не використовувати з огляду на те, що на початку руху виникають значні рушійні прискорення стрілової системи [11, 12]. Для виходу на усталену швидкість система швидко розганяється і потім гальмується – це призводить до зміни напрямку швидкості руху кінця хобота. Такий швидкий розгін спричинює велике значення динамічної складової внутрішнього зусилля в зубчастій рейці. Внаслідок цього відбувається зміна повного внутрішнього зусилля в межах від  $F = -44,17$  кН до  $F = 122,82$  кН.

**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 | 10,25              | 10,54  | 10,83  | 11,13  | 11,42  |
| $\dot{x}, m/c$           | 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 | 0,82               | 0,705  | 0,62   | 0,55   | 0,49   |
| $x_A, m$                 | min | 8,5                | 8,5    | 8,5    | 8,5    | 8,5    |
|                          | max | 10,25              | 10,54  | 10,83  | 11,13  | 11,42  |
| $\dot{x}_A, m/c$         | min | -0,49              | -0,13  | 0      | 0      | 0      |
|                          | max | 1,74               | 1,301  | 1,05   | 1,05   | 1,05   |
| $\ddot{x}_A, m/c^2$      | min | -3,14              | -1,79  | -1,05  | -0,63  | -0,36  |
|                          | max | 3,82               | 2,41   | 1,63   | 1,15   | 0,84   |
| $\alpha, рад$            | min | 1,26               | 1,257  | 1,25   | 1,247  | 1,242  |
|                          | max | 1,29               | 1,29   | 1,29   | 1,29   | 1,29   |
| $\dot{\alpha}, рад/c$    | min | -0,03              | -0,02  | -0,02  | -0,02  | -0,02  |
|                          | max | 0,008              | 0,002  | 0      | 0      | 0      |
| $\ddot{\alpha}, рад/c^2$ | min | -0,05              | -0,03  | -0,02  | -0,02  | -0,01  |
|                          | max | 0,05               | 0,03   | 0,02   | 0,009  | 0,005  |
| $F_C, кН$                | min | -44,17             | -44,17 | -44,17 | -44,17 | -44,17 |
|                          | max | -27,4              | -25,4  | -23,65 | -22,11 | -20,76 |
| $F_D, кН$                | min | 0                  | 0      | 0      | 0      | 0      |
|                          | max | 164,75             | 109,4  | 81,05  | 75,19  | 76,57  |
| $F, кН$                  | min | -44,17             | -44,17 | -44,17 | -44,17 | -44,17 |
|                          | max | 122,82             | 67,95  | 46,9   | 43,67  | 43,88  |

При тривалості розгону  $t_1 = 3,5$  с відбувається більш плавний розгін стрілової системи. Плавний рух досягається за рахунок зменшення максимального прискорення вантажу до  $\ddot{x} = 0,705$  м/с<sup>2</sup>. Таке прискорення призвело до зменшення максимального

внутрішнього зусилля в рейці майже вдвічі в порівнянні з тривалістю розгону  $t_1 = 3c$ .

Набагато сприятливіші швидкісні характеристики стрілова система має при тривалості пуску  $t_1 = 4c$  – відбувається плавна зміна швидкості та прискорення кінцевої точки хобота. При цьому вдається забезпечити симетричний цикл зміни внутрішнього навантаження в рейці у межах  $F = -44,17...46,9 кН$ .

При подальшому збільшенні тривалості пуску до  $t_1 = 4,5c$  та  $t_1 = 5c$  характер кінематичних характеристик ШЗСС і вантажу майже не змінюється. Хоча спостерігається деяке покращення плавної зміни навантаження зубчастої рейки. Однак, збільшення тривалості пуску призводить до суттєвого збільшення тривалості вильоту стрілової системи. Це, як наслідок, приводить до зменшення продуктивності робочого процесу.

Тому найбільш прийнятною тривалістю пуску буде час у межах  $t_1 = 3,5...4c$ .

Для повного відображення кінематичних та силових характеристик під час процесу пуску ШЗСС крана побудовано графічні залежності зміни – горизонтальних координат вантажу та точки А хобота (рис. 2), горизонтальних швидкостей (рис. 3) та прискорень (рис. 4) цих же точок. Графічні залежності побудовано за умови тривалості пуску  $t_1 = 4c$ .

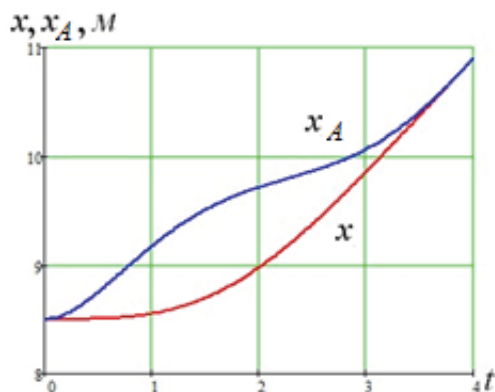


Рис. 2. Графіки зміни горизонтальних координат.  
Fig. 2. Graphs changes of horizontal coordinates.

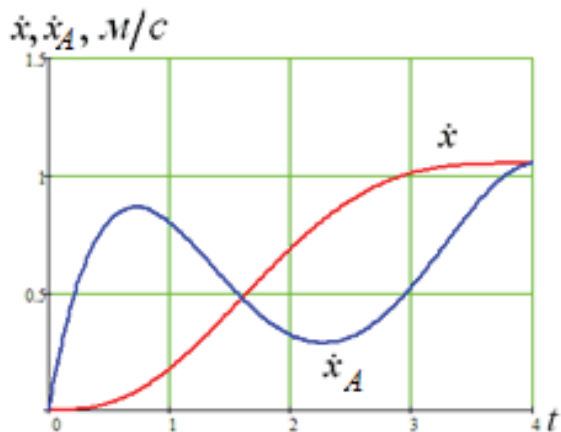


Рис. 3. Графіки зміни швидкостей.  
Fig. 3. The schedule change of speeds.

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

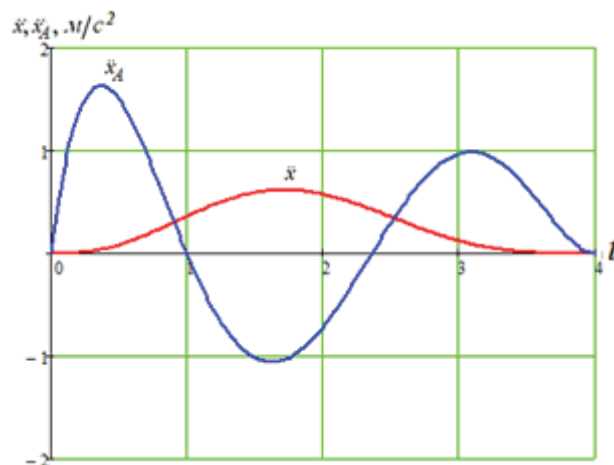


Рис. 4. Графіки зміни прискорень.  
Fig. 4. The graphics changes of acceleration.

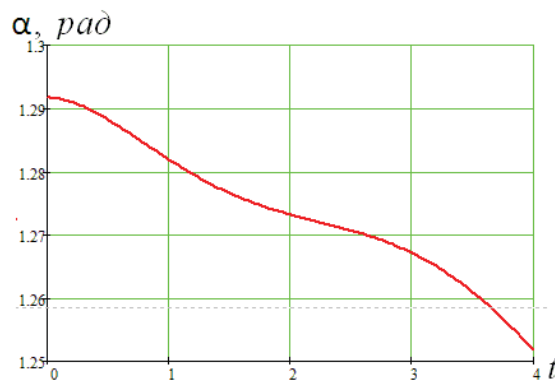


Рис. 5. Графік зміни кутової координати стріли.  
Fig. 5. Graphs changes of angular coordinate of arrow.

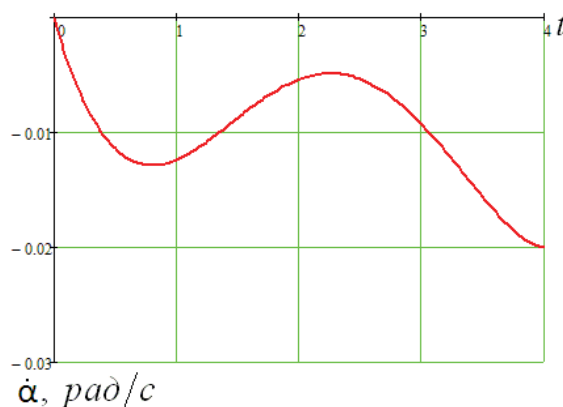


Рис. 6. Графік зміни кутової швидкості стріли.  
Fig. 6. Graphs change in angular velocity of arrow.

Із графічних залежностей на 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).

Із графічних залежностей 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.

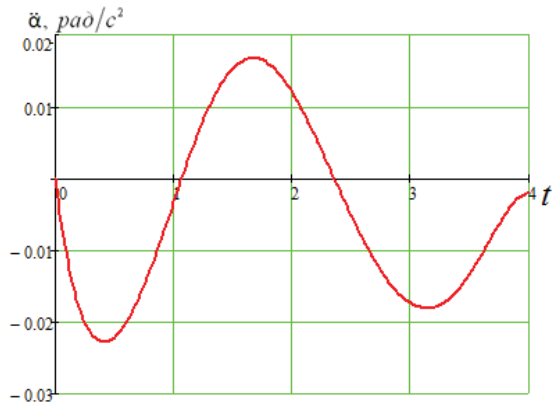


Рис. 7. Графік зміни кутового прискорення стріли.

Fig. 7. Graphs changes the angular acceleration of arrow.

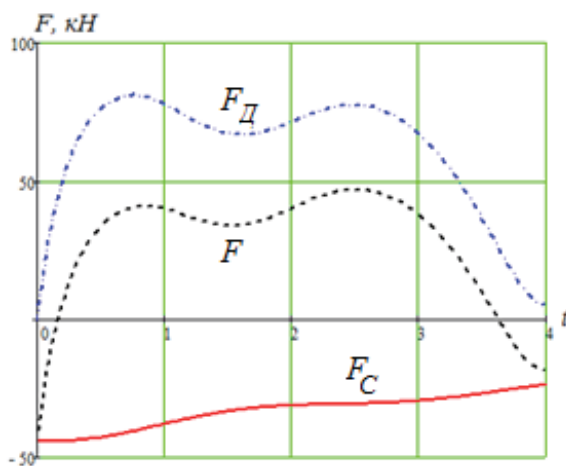


Рис. 8. Графіки зміни внутрішніх зусиль в рейці.

Fig. 8. Graphs of internal change efforts of rail.

### Висновки

1. У роботі проведено дослідження кінематичних та силових характеристик ШЗСС під час перехідного режиму пуску, який здійснюється за законом, що відповідає оптимізації режиму руху за критерієм середньоквадратичного значення ривків, яке показало доцільність використання такого режиму руху стрілової системи в процесі пуску.

2. Визначено залежність руху кінцевої точки хобота, до якої на канаті підвішено вантаж. За допомогою встановленої залежності проведено кінематичний та силовий аналіз під час руху стрілової системи за різної тривалості процесу пуску, з якого встановлено доцільну тривалість пуску.

3. Встановлено, що найбільш сприятливою, з точки зору забезпечення плавності руху вантажу та бажаної продуктивності крана, є тривалість розгону,

що становить 4 с. При такій тривалості розгону забезпечується плавна зміна внутрішнього зусилля в зубчастій рейці приводу, що позитивно впливає на загальну динаміку руху ШЗСС стрілової системи та підвищує надійність роботи приводного механізму зміни вильоту та крана в цілому.

4. Для встановленої тривалості розгону побудовано графічні залежності зміни кінематичних характеристик вантажу, кінцевої точки хобота та стріли, що дозволило оцінити кінематику руху всієї стрілової системи крана в процесі зміни вильоту.

### Список літератури

1. Паламарчук Д. А. Дослідження руху стрілової системи крана під час пуску за законом оптимізації прискорень. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 2015. №85. С. 21-27.
2. Ловейкін В. С., Паламарчук Д. А. Оптимізація режимів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана. Монографія. Київ. ЦП „КОМПРИНТ”, 2015. 224 с.
3. Суглобов В. В., Михеев В. А., Ткачук Е. В. Оптимизация действующих нагрузок на механизм изменения вылета стрелы с целью снижения энергопотребления порталного крана. Захист металургійних машин від поломок: зб. наукових праць ПДТУ, 2013. Вип. 15. С. 133-140.
4. Min-Saeng Kim, Yoo In Shin, Chul Ki Song Structural analysis for a 70/15 ton×105 m level luffing crane. J. Korean Soc. Precis. Eng, 2013. Vol. 30, No. 9. pp. 983-990.
5. Ehsan A. Maleki Dynamics and control of a small-scale mobile boom crane. A thesis presented to the academic faculty. Georgia institute of technology december, 2010. 120 p.
6. Ловейкін В. С., Паламарчук Д. А. Исследование движущих сил в механизме изменения вылета стреловой системы крана. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 2014. №84. С. 39-45.
7. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод. Справочник. Москва. Энергоатомиздат, 1988. 344 с.
8. Найдено Е. В. Управление электроприводом механизмов горизонтального перемещения с подвешенным грузом Електромашинобудування та електрообладнання, 2007. № 69. С. 17-22.
9. Бортыков Д. Е., Некрасова А. В., Соколов С. А. Моделирование эксплуатационной нагруженности элементов порталных кранов. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008. №60. С. 203-211.
10. Keqin LI, Cuxiang Jiang Inverse design of a new double-link luffing mechanism and realization on MATLAB. Proceedings of the 3rd ICMEM International conference on mechanical engineering and mechanics. October 21-23, 2009. Beijing, P. R. China. pp. 301-304.
11. Bargazov E., Bortyakov D., Uzunov T., Alipiev O., Antonov S. Optimization research of the cargo pendulum and units displacements of the gantry cranes

level luffing jib system. International scientific journal "Machines. Technologies. Materials.", 2018. Year XII, Issue 10. pp. 386-391.

12. *Dong Soo Kim, Jongsoo Lee* Structural design of a level-luffing crane through trajectory optimization and strength-based size optimization. Structural and multidisciplinary optimization; Heidelberg, 2015. Vol. 51, No. 2. pp. 515-531.

### References

1. *Palamarchuk D. A.* (2015). Study of motion boom crane during start statutory optimization accelerated. Allukrainian collection of scientific works "Mining, constructional, road and melioration machines". 85. 21-27.

2. *Loveikin V. S., Palamarchuk D. A.* (2015). Optimization of modes of movement in the horse head system of the crane. Kyiv. Publisher TsP «KOMPRINT», 224.

3. *Suglobov V. V., Mikheev V. A., Tkachuk E. V.* (2013). Optimization of acting loads on the level luffing mechanism in order to reduce the energy consumption of the portal crane. Protection of metallurgical machines from breakdowns. 15. 133-140.

4. *Min-Saeng Kim, Yoo In Shin, Chul Ki Song.* (2013). Structural analysis for a 70/15 ton×105 m level luffing crane. J. Korean Soc. Precis. Eng., 30(9). 983-990.

5. *Ehsan A. Maleki.* (2010). Dynamics and control of a small-scale mobile boom crane. A thesis presented to the academic faculty. Georgia institute of technology december. 2010. 120.

6. *Loveikin V. S., Palamarchuk D. A.* (2014). Study of driving forces in the mechanism of changing the boom system of the crane. Allukrainian collection of scientific works "Mining, constructional, road and melioration machines". 84. 39-45.

7. *Yaure A. G., Pevzner E. M.* (1988). Crane electric drive. Directory. Moscow. Energoatomizdat. 344.

8. *Naidenko E. V.* (2007). Control of an electric drive of horizontal movement mechanisms with a suspended load. Electrical engineering and electrical equipment. 69. 17-22.

9. *Bortiaikov D. E., Nekrasova A. V., Sokolov S. A.* (2008). Modeling of operational loading of elements of portal cranes. Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. 60. 203-211.

10. *Keqin Li, Cuxiang Jiang.* (2009). Inverse design of a new double-link luffing mechanism and realization on MATLAB. Proceedings of the 3rd ICMEM International conference on mechanical engineering and mechanics. October 21–23. Beijing, P. R. China. 301-304.

11. *Bargazov E., Bortyakov D., Uzunov T., Alipiev O., Antonov S.* (2018). Optimization research of the cargo pendulum and units displacements of the gantry cranes level luffing jib system. International scientific journal "Machines. Technologies. Materials." Year XII. 10. 386-391.

12. *Dong Soo Kim, Jongsoo Lee.* (2015). Structural design of a level-luffing crane through trajectory optimization and strength-based size optimization. Structural and multidisciplinary optimization; Heidelberg. 51(2). 515-531.

### АНАЛІЗ ПУСКА ШАРНІРНО-СОЧЛЕНЕНОЇ СТРЕЛОВОЇ СИСТЕМИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМУ РЫВКОВОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ

*В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук, Ю. А. Ромасевич*

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты аналитического исследования кинематических и силовых параметров движения шарнирно-сочлененной стреловой системы крана в начале движения. Исследование проведено при разгоне электродвигателя механизма изменения вылета из состояния покоя до частоты вращения, соответствующей номинальной рабочей скорости перемещения груза. При этом пуск электродвигателя происходит при условии движения всей стреловой системы вместе с грузом по закону оптимизации рывков.

Использование указанного закона позволяет полностью сгладить раскачивание груза в начале движения. Кроме того, к концу разгона обеспечиваются одинаковые скорости и ускорения между конечной точкой хобота крана и грузом. Это позволяет обеспечить высокую плавность движения стреловой системы и избежать раскачивания груза после выхода ротора электродвигателя на номинальную частоту вращения.

Также проведено исследование статического, динамического и полного усилия в зубчатой рейке привода.

Указанные исследования, проведено при различной продолжительности процесса пуска электродвигателя по закону оптимизации рывков. Это позволило установить зависимость исследуемых кинематических и силовых параметров от длительности переходного процесса. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по выбору длительности разгона электродвигателя в механизме изменения вылета.

В ходе исследования построены графики изменения исследуемых параметров стреловой системы во времени. Графические зависимости получены при наиболее приемлемой продолжительности режима разгона с точки зрения уменьшения динамических нагрузок на звенья стреловой системы, улучшение технологического процесса работы крана и его эргономики.

**Ключевые слова:** шарнирно-сочлененная стреловая система, механизм изменения вылета, оптимальное управление, раскачивание груза, усилия.

### ANALYSIS OF STARTING IN HORSE HEAD SYSTEM AT OPTIMAL JERKING MODE OF MOVEMENT

*V. S. Loveikin, D. A. Palamarchuk, Yu. O. Romasevych*

**Abstract.** This article presents the results of an analytical study of the kinematic and power parameters of the movement of the articulated boom system of the crane at the beginning of the movement. The study was carried out during the acceleration of the electric motor of the mechanism for changing the departure from the state of rest to the rotation frequency corresponding to the nominal operating speed of the load movement. In this case, the start

of the electric motor occurs, provided that the entire boom system moves along with the load according to the law of jerking optimization.

The using of this regularity allows you to completely smooth out the swinging of the load at the beginning of the movement. In addition, towards the end of the acceleration, the same speeds and accelerations are provided between the end point of the crane trunk and the load. This makes it possible to ensure high smoothness of movement of the boom system, and to avoid the load swinging after the rotor of the electric motor reaches the rated speed.

Also, a study of static, dynamic and total force in the drive gear rack was carried out.

These studies were carried out at different duration of the process of starting the electric motor according to the law of jerking optimization. This made it possible to establish the dependence of the studied kinematic and power parameters on the duration of the transient process. Based on the above, recommendations have been developed for choosing the duration of the acceleration of the electric motor in the mechanism for changing the departure.

During of the study, graphs of changes in the studied parameters of the boom system in time were built. Graphical dependencies were obtained with the most acceptable duration of the acceleration mode from the point of view of reducing the dynamic loads on the links of the boom system, improving the technological process of the crane and its ergonomics.

**Key words:** horse head system, drive change mechanism, optimal control, load oscillations, efforts.

**В. С. Ловейкін** ORCID 0000-0003-4259-3900.

**Д. А. Паламарчук** ORCID 0000-0002-8019-9659.

**Ю. О. Ромасевич** ORCID 0000-0001-5069-5929.

## Зміст

|   |         |
|---|---------|
| 1. Аналіз експериментальних досліджень оптимального керування рухом механізму переміщення візка баштового крана<br><i>В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, О. В. Стехно</i> .....   | 5-12    |
| 2. Моделювання формування структури в конструкційних сталях<br><i>Є. Г. Афтандіяни</i> .....  | 13-22   |
| 3. Моделювання центроїд некруглих коліс із внутрішнім і зовнішнім коченням із дуг симетричних кривих<br><i>Т. А. Кресан, С. Ф. Пилипака, І. Ю. Грищенко, Я. С. Кремець</i> .....                                      | 23-32   |
| 4. Дослідження мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату<br><i>В. С. Хмельовський</i> .....  | 33-39   |
| 5. Вплив безвідмовності дозуючого елемента з комірками направленої дії пневмомеханічного висівного апарата на ймовірність точності висіву технічних культур<br><i>П. С. Попик</i> .....                               | 41-47   |
| 6. Ділова гра як спосіб підвищення ефективності навчального процесу при вивченні теми надання домедичної допомоги потерпілим у разі нещасних випадків<br><i>С. М. Голопура, П. О. Чмара</i> .....                     | 49-56   |
| 7. Метод оцінки конкурентоспроможності автотранспортних перевезень на основі багатомірної векторної моделі показників якості транспортного обслуговування<br><i>О. М. Загурський</i> .....                            | 57-63   |
| 8. Вплив конструктивних і технологічних параметрів розроблених варіантів борони з гвинтовими робочими органами на ефективність заробляння рослинних решток<br><i>М. Б. Клендій, М. І. Клендій, Р. В. Шатров</i> ..... | 65-71   |
| 9. Підходи до оптимізації функціонування транспортних систем міст за екологічними критеріями<br><i>О. М. Загурський, А. М. Огієнко</i> .....  | 73-79   |
| 10. Дослідження шарнірного з'єднання гвинтового секційного робочого органу<br><i>І. І. Чвартацький, А. В. Грабар, Р. В. Шатров</i> .....  | 81-87   |
| 11. Дискретна модель динаміки руху ланцюгового конвеєра<br><i>М. М. Коробко</i> .....   | 89-94   |
| 12. Покращення продуктивності бункера протруювача насіння<br><i>О. М. Вечера</i> .....  | 95-99   |
| 13. Дослідження руху частинки по зовнішній поверхні циліндра під час його поступальних коливань в горизонтальних площинах<br><i>Т. М. Воліна, С. Ф. Пилипака</i> .....  | 101-105 |
| 14. Ефективність використання дигестату біогазових установок<br><i>В. М. Поліщук, Д. А. Дерев'янка, С. А. Шворов, Є. О. Дворник, Т. С. Давиденко</i> .....  | 107-115 |
| 15. Форми дистанційного викладання дисципліни «безпека праці та життєдіяльності» студентам спеціальності агроінженерія<br><i>Л. Е. Піскунова, Т. О. Зубок</i> .....   | 117-122 |
| 16. Оптимізація хімічного складу сталей для шестерень сільськогосподарського машинобудування<br><i>О. Є. Семеновський, Л. Л. Тітова</i> .....   | 123-129 |
| 17. Метод пошуку екстремуму багатомірних функцій при вирішенні інженерних задач машин для лісотехнічних робіт<br><i>Л. Л. Тітова, О. В. Надточій</i> .....  | 131-141 |

---

|  |         |
|--|---------|
| 18. Аналіз ефективності процесу експлуатаційної і технологічної надійності сільськогосподарських машин<br><i>Р. Ф. Овчар</i> .....                                       | 143-152 |
| 19. Аналіз пуску шарнірно-зчленованої стрілової системи при оптимальному ривковому режимі руху<br><i>В. С. Ловейкін, Д. А. Паламарчук, Ю. О. Ромасевич</i> .....         | 153-160 |
| 20. Дослідження ротаційної стригальної машинки<br><i>В. С. Хмельовський, К. Д. Веселівський</i> .....  | 161-167 |
| 21. Залежність техніко-експлуатаційних показників орного агрегату від твердості ґрунту, глибини обробітку, довжини гону та робочої швидкості<br><i>В. М. Зубко</i> ..... | 169-175 |

## Contents

|  |         |
|--|---------|
| 1. Analysis of experimental studies of optimal control of tower crane trolley movement mechanism<br><i>V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevych, O. V. Stekhno</i> .....                                    | 5-12    |
| 2. Modelling of structure forming in structural steels<br><i>Ye. G. Aftandiliants</i> .....  | 13-22   |
| 3. Simulation of centroids of non-circular wheels with internal and external rolling from arcs of symmetrical curves<br><i>T. A. Kresan, S. F. Pylypaka, I. Yu. Grischenko, Ya. S. Kremets</i> ..... | 23-32   |
| 4. Research of mobile combined feed preparation unit<br><i>V. S. Khmelovskiy</i> .....   | 33-39   |
| 5. Influence of speed of dispenser movement of directed impact on accuracy of seeding of main technical crops<br><i>P. S. Popyk</i> .....  | 41-47   |
| 6. Business game as way to increase efficiency of educational process in study topics providing of first aid to victims in accidents<br><i>S. M. Holopura, P. O. Chmara</i> .....                    | 49-56   |
| 7. Method of assessment of transportation competitiveness on the basis of a multiple vector model of transportation services quality indicators<br><i>O. M. Zagurskiy</i> .....                      | 57-63   |
| 8. Research of influence of constructive and technological parameters of developed variants of screws with screw working bodies rabbit<br><i>M. B. Klendii, M. I. Klendii, R. V. Shatrov</i> .....   | 65-71   |
| 9. Approaches to optimization of functioning of cities by environmental criteria<br><i>O. M. Zagurskiy, A. M. Ohienko</i> .....  | 73-79   |
| 10. Research of hinged joint of screw sectional working body<br><i>I. I. Chvartatskiy, A. V. Grabar, R. V. Shatrov</i> .....   | 81-87   |
| 11. Discrete model of chain conveyor movement dynamics<br><i>M. M. Korobko</i> .....   | 89-94   |
| 12. Improvement of quality of work of seed treater bunker-dispenser<br><i>O. M. Vechera</i> .....  | 95-99   |
| 13. Research of particle movement on cylinder outer surface during its progressive oscillations in horizontal planes<br><i>T. M. Volina, S. F. Pylypaka</i> .....                                    | 101-105 |
| 14. Efficiency of digestat of biogas plants<br><i>V. M. Polishchuk, D. A. Derevianko, S. A. Shvorov, Ye. O. Dvornik, T. S. Davydenko</i> .....   | 107-115 |
| 15. Forms of distance education of discipline "Labor and Life Safety" for students of specialty Agroengineering<br><i>L. E. Piskunova, T. O. Zubok</i> .....   | 117-122 |
| 16. Optimization of chemical composition of steel for gearwheels of agricultural industry engineering<br><i>O. Ye. Semenovskyi, L. L. Titova</i> .....   | 123-129 |
| 17. Method for searching the extremum of multidimensional functions in solving engineering problems of machines for forestry works<br><i>L. L. Titova, O. V. Nadtochiy</i> .....                     | 131-141 |

|  |         |
|--|---------|
| 18. Analysis of effectiveness of process operational and technological reliability of agricultural mashines<br><i>R. F. Ovchar</i> .....                                 | 143-152 |
| 19. Analysis of starting in horse head system at the optimal jerking mode of movement<br><i>V. S. Loveikin, D. A. Palamarchyk, Yu. O. Romasevych</i> .....               | 153-160 |
| 20. Research of a rotary cutting machine<br><i>V. S. Khmelovskyi, K. D. Veselivskyi</i> .....  | 161-167 |
| 21. Dependence of technical and operating indicators of the planting unit on soil hardness, tilling depth,<br>run length and operating speed<br><i>V. M. Zubko</i> ..... | 169-175 |

### **Guidelines for authors (2020)**

The journal publishes the original research papers. The papers (min. 5 pages) should not exceed 16 pages including tables and figures. Acceptance of papers for publication is based on two independent reviews commissioned by the Editor.

Authors are asked to transfer to the Publisher the copyright of their articles as well as written permissions for re-production of figures and tables from unpublished or copyrighted materials.

#### **Articles should be submitted electronically to the Editor and fulfill the following formal requirements:**

- Clear and grammatically correct script in English,
- Format of popular Windows text editors (A4 size, 10 points Times New Roman font, single interline, left and right margin of 2.0 cm),
- Every page of the paper including the title page, text, references, tables and figures should be numbered,
- SI units should be used.

#### **Please organize the script in the following order (without subtitles):**

Title, Author(s) name (s), Affiliations, Full postal addresses, Corresponding author's e-mail  
Abstract (up to 200 words), Keywords (up to 5 words), Introduction, Materials and Methods, Results, Discussion (a combined Results and Discussion section can also be appropriate), Conclusions (numbered), References, Tables, Figures and their captions.

#### **Note that the following should be observed:**

An informative and concise title; Abstract without any undefined abbreviations or unspecified references; No no-menclature (all explanations placed in the text);

References cited by the numbered system (max 5 items in one place); Tables and figures (without frames) placed out of the text (after References) and figures additionally prepared in the graphical file format jpg or cdr.

Make sure that the tables do not exceed the printed area of the page. Number them according to their sequence in the text. References to all the tables must be in the text.

Do not use vertical lines to separate columns. Capitalize the word 'table' when used with a number, e.g. (Table 1).

Number the figures according to their sequence in the text. Identify them at the bottom of line drawings by their number and the name of the author. Special attention should be paid to the lettering of figures – the size of lettering must be big enough to allow reduction (even 10 times). Begin the description of figures with a capital letter and observe the following order, e.g. Time(s), Moisture (% vol), (% m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup> or (% gg<sup>-1</sup>), Thermal conductivity (W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>).

Type the captions to all figures on a separate sheet at the end of the manuscript.

Give all the explanations in the figure caption. Drawn text in the figures should be kept to a minimum. Capitalize and abbreviate 'figure' when it is used with a number, e.g. (Fig. 1).

Colour figures will not be printed.

**Make sure that the reference list contains about 30 items. It should be numbered serially and arranged al-phabeticly by name of first author and then others, e.g.**

7. Zhen Zhang, Menglong Liu, Zhongqing Su, Yi Xiao. (2020). Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation: A comparative study. *Journal of Sound and Vibration*. 383. 156-170.

References cited in the text should be given in parentheses and include a number e.g. [7].

Any item in the References list that is not in English, French or German should be marked, e.g. (in Italian), (in Ukrainian).

Leave ample space around equations. Subscripts and superscripts have to be clear. Equations should be numbered serially on the right-hand side in parentheses. Capitalize and abbreviate 'equation' when it is used with a number, e.g. Eq. (1). Spell out when it begins a sentence. Symbols for physical quantities in formulae and in the text must be in italics. Algebraic symbols are printed in upright type.

Acknowledgements will be printed after a written permission is sent (by the regular post, on paper) from persons or heads of institutions mentioned by name.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Machinery & Energetics  
Journal of Rural Production Research

since 2010 till 2018  
[Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series:  
Technique and Energy of APK]

Техніка та енергетика  
Журнал наукових досліджень сільськогосподарського виробництва

з 2010 року до 2018 року  
[Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України.  
Серія: техніка та енергетика АПК]

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВИПУСК 11

№ 4

Свідоцтво про державну реєстрацію  
Серія КВ №23828 – 13668 ПР від 01.03.2019

Редактор І. Л. Роговський

03041, Київ-41, вул. Героїв оборони, 15

Здано до набору 28.10.2020  
Формат 60×84/16  
Наклад 100 прим.

Підписано до друку 28.10.2020  
Папір офсетний.  
Зам. № 0993 від 28.10.2020

Редакційно-видавничий відділ НУБіП України  
03041, Київ, пров. Сільськогосподарський, 4.  
т. 527-80-49