

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

<http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01>

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. 12

№ 1

(January – March)

Kyiv – 2021

Editor-in-Chief

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

Vice-Editor

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

PhD Oleksandr Synyavskiy, 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. Valeriy Voytiuk, National University of Life and Environmental Science of Ukraine in Kyiv, Ukraine

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

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

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

Prof. Ludvikas Spokas, Agrarian University in Kaunas, Lithuania

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

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

Prof. Vjacheslav Shebanin, Mykolayiv National Agrarian University, Ukraine

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

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

Prof. Tadeusz Zloto, Częstochowa University of Technology, Poland

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. 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 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. Wacław Romaniuk, Institute of Technology and Life Sciences Branch in Warsaw, Poland

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

All the articles are available on the webpage: 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, 2021

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

Printing

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

Publishing Office address

AgroMediaGroup, Novokonstantinovska 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/machenergy2021.01>

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 12

№ 1

(січень – березень)

Київ – 2021

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Редкол. :
В. С. Ловейкін (голов. ред.) та ін. Київ. 2021. Вип. 12. № 1. 160 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 Міністерства 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.; І. Л. Роговський, канд. техн. наук, старший наук. співр. (заступники 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. Заблодський, д-р техн. наук, проф.; Н. А. Заєць, д-р техн. наук, проф.; В. В. Каплун, д-р техн. наук, проф.; В. В. Коваль, д-р техн. наук, проф.; В. В. Козирський, д-р техн. наук, проф.; В. П. Лисенко, д-р техн. наук, проф.; К. Г. Лопатко, 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.; Л. Л. Тітова, канд. техн. наук, доц.; 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.

Рекомендовано до друку Вченою радою НУБіП України, протокол № 5 від 22 грудня 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, 2021

УДК 621.873

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ РУХУ ПІД ЧАС ПУСКУ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЇ СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА

В. С. Ловейкін¹, Д. А. Паламарчук², Ю. О. Ромасевич¹, М. М. Балака²

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна;

²Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна.

Стаття зі спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: lovvs@ukr.net.

Історія статті: отримано – листопад 2020, акцептовано – грудень 2020.

Бібл. 14, рис. 9, табл. 0.

Анотація. У даній роботі наведено результати аналітичного дослідження кінематичних характеристик шарнірно-зчленованої стрілової системи порталного крана на початку руху. Вказане дослідження проведено на ділянці розгону електродвигуна механізму зміни вильоту, від початку ввімкнення до досягнення номінальної частоти обертання. При цьому, номінальна частота обертання ротора електродвигуна відповідає робочій швидкості горизонтального переміщення вантажу. Розгін електродвигуна відбувається за законом, що відповідає оптимізації середньоквадратичного відхилення швидкостей вантажу та осі кінцевого обвідного блока.

Проведено дослідження руху ШЗСС крана під час пуску за законом оптимізації середньоквадратичного відхилення швидкостей при різних крайових умовах. Побудовано графічні залежності кінематичних характеристик вантажу та його точки підвісу на хоботі. Це дозволяє встановити можливість практичного використання вказаного закону. На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо вибору початкових та кінцевих крайових умов під час розгону двигуна механізму зміни вильоту.

Також, проаналізовано кінематичні характеристики руху стрілової системи порталного крана під час пуску за законами оптимізації середньоквадратичного відхилення прискорень та ривків, а також виконано порівняння з рухом стрілової системи за законом оптимізації середньоквадратичного відхилення швидкостей.

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

Постановка проблеми

Горизонтальне переміщення вантажу за допомогою механізму зміни вильоту є окремим робочим рухом кранів з шарнірно-зчленованою стріловою системою (ШЗСС). Цей робочий рух може виконуватись самостійно або шляхом суміщення з

іншими робочими рухами, в залежності від технологічних потреб під час роботи крана.

Важливими проблемами при використанні кранів під час перевантажувальних робіт є скорочення тривалості робочого циклу перевантаження, а також збільшення міжремонтного циклу металоконструкції стрілової системи та крана в цілому. Поставлені питання можна вирішити шляхом мінімізації розгойдувань вантажу на гнучкому канатному підвісі. Найбільші розгойдування вантажу на гнучкому підвісі спостерігаються під час роботи електродвигуна механізму зміни вильоту на перехідних режимах.

Розгойдування негативно впливають на такі показники ефективності кранів з ШЗСС як: продуктивність, економічність, надійність маневреність тощо [1].

Величина відхилення вантажного канату від вертикалі залежить від таких факторів: маси вантажу, швидкості його горизонтального переміщення, тривалості включення електродвигуна механізму, положення центра мас вантажу відносно точки підвісу, вітрових навантажень тощо.

В зв'язку з цим, виникає потреба дослідження руху стрілової системи за законом оптимізації середньоквадратичного відхилення швидкостей на ділянці пуску.

Аналіз останніх досліджень

Грунтовні дослідження кінематики та динаміки руху такої стрілової системи проведено у монографії [1]. Зокрема, наведено результати досліджень руху стрілової системи за різних законів, що відповідають мінімізації середньоквадратичних відхилень переміщень, швидкостей, прискорень та ривків вантажу та кінцевої точки хобота. Важливим є те, що вказані дослідження проведені при переміщенні вантажу від мінімального значення вильоту до максимального. Однак процес пуску стрілової системи при зміні вильоту вантажу не досліджувався.

У статті [2] досліджено рух ШЗСС крана під час розгону за законом оптимізації середньоквадратичного відхилення прискорень вантажу та осі кінцевого обвідного блоку хобота. Побудовано графічні залежності зміни кінематичних та силових параметрів стрілової системи за різної тривалості цього перехідного режиму руху.

У роботі [3] проаналізовано рух стрілової системи порталного крана під час розгону за законом мінімізації середньоквадратичної різниці між ривками вантажу та осі кінцевого обвідного блоку. Побудовано графічні залежності зміни кінематичних характеристик ШЗСС та навантажень у зубчастій рейці при різній тривалості перехідного режиму руху.

ШЗСС порталного крана є складною механічною системою з нелінійними функціями положення ланок. Під час досліджень руху такої системи в ряді випадків її замінюють спрощеною моделлю, яка не завжди в повному обсязі описує реальну картину руху. Зокрема, у статті [4] розглядалася проблема оптимізації навантажень на ланки стрілової системи з метою зниження енергоспоживання привідних електродвигунів механізму зміни вильоту. Однак, наведений спосіб у неповному обсязі розкриває зміну інерційних сил на неусталених ділянках руху стрілової системи крана.

Автори статті [5] пропонують мінімізувати 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.

Аналіз літературних джерел по тематиці досліджень показав, що науковці пропонують різні підходи поліпшення динамічних характеристик стрілових систем. При цьому, загальною метою є покращення наступних показників ефективності кранів: продуктивності, економічності, надійності, маневреності, ергономічності тощо [1].

Мета досліджень

Метою проведеного дослідження є отримання рекомендацій щодо можливості застосування закону оптимізації середньоквадратичних відхилень швидкостей під час розгону електродвигуна рейкового механізму зміни вильоту стрілової системи.

Результати досліджень

У попередніх дослідженнях [1] запропоновано такий режим руху ШЗСС, що забезпечує мінімізацію відхилення між швидкістю кінцевої точки хобота D і центром мас вантажу B (рис. 1), який описується наступною умовою

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

де \dot{x} – горизонтальна складова швидкості вантажу; \dot{x}_D – горизонтальна складова швидкості кінцевого

обвідного блоку хобота; n – кількість положень стрілової системи під час зміни вильоту.

Дослідження руху проведено для стрілової системи порталного крана МАРК-40 з наступними кінематичними та масовими характеристиками:

- 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.

Динамічна модель стрілової системи крана наведена на рис. 1.

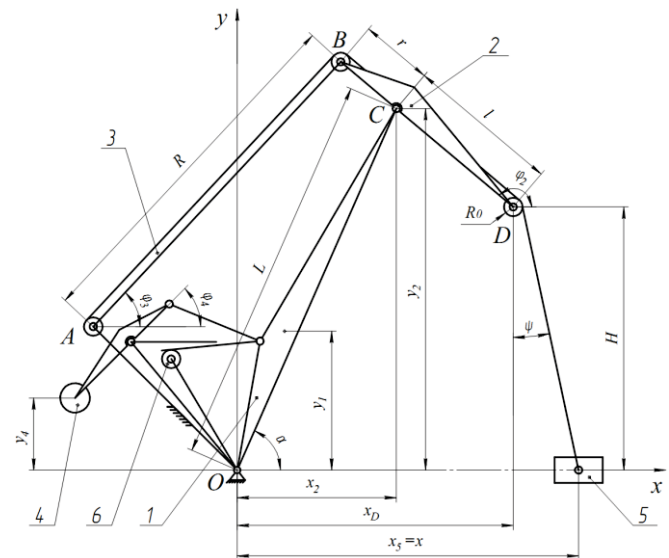


Рис. 1. Схема шарнірно-зчленованої стрілової системи з рейковим механізмом зміни вильоту: 1 – стріла; 2 – прямолінійний хобот; 3 – відтяжка; 4 – противага; 5 – вантаж; 6 – привідна шестерня

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

На рис. 1 ШЗСС використано наступні позначення геометричних характеристик стрілової системи: y_1, y_2, y_4 – вертикальні координати центрів мас відповідно стріли, хобота та рухомої противаги; x_2, x – горизонтальні координати центрів мас відповідно хобота і вантажу; α – кутова координата стріли; $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – кутові координати відповідно хобота, відтяжки та коромисла противаги; L – довжина стріли; l – довжина хобота; r – довжина контрхобота; R –

довжина відтяжки; R_0 – радіус кінцевого обвідного блока; H – довжина підвісу вантажу; ψ – кутова координата відхилення вантажного канату від вертикалі. За узагальнені координати в цій моделі прийнято горизонтальну координату центру мас вантажу та кутову координату стріли.

Оскільки моделю руху вантажу є математичний маятник з рухомою точкою закріплення та довжиною каната H , то для нього є справедливими наступні залежності:

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

де $x_D, \dot{x}_D, \ddot{x}_D, \overset{IV}{\ddot{x}}_D$ – кінематичні характеристики осі обвідного блока хобота D , відповідно, горизонтальна координата, швидкість, прискорення та ривок; $x, \dot{x}, \ddot{x}, \overset{IV}{\ddot{x}}, \overset{V}{\ddot{x}}$ – кінематичні характеристики центру мас вантажу, відповідно, горизонтальна координата, швидкість, прискорення, ривок та четверта і п'ята похідні за часом від координати.

Умова мінімізації різниці швидкостей забезпечується інтегральним функціоналом, який відображає суму квадратів відхилень швидкостей на всій ділянці перехідного процесу

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

де t_1 – тривалість перехідного процесу під час пуску стрілової системи.

Підінтегральний вираз цього функціоналу відображає геометричні співвідношення між горизонтальними координатами вантажу x і кінцевої точки хобота x_A та висотою H .

Вказаний функціонал (3) може бути мінімізований при функціях, які є розв'язком рівняння Ейлера-Пуассона, яке має наступний вигляд

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

Приведене рівняння зводиться до диференціального рівняння шостого порядку і має вигляд

$$\overset{VI}{x} = 0. \quad (5)$$

Після інтегрування цього рівняння за часом, отримано залежності, що описують кінематичні характеристики руху вантажу за встановленим законом:

$$\begin{aligned} \overset{V}{x} &= B_1; \overset{IV}{x} = B_1 t + B_2; \overset{III}{\ddot{x}} = \frac{1}{2} B_1 t^2 + B_2 t + B_3; \\ \overset{II}{\dot{x}} &= \frac{1}{6} B_1 t^3 + \frac{1}{2} B_2 t^2 + B_3 t + B_4; \\ \overset{I}{\dot{x}} &= \frac{1}{24} B_1 t^4 + \frac{1}{6} B_2 t^3 + \frac{1}{2} B_3 t^2 + B_4 t + B_5; \\ x &= \frac{1}{120} B_1 t^5 + \frac{1}{24} B_2 t^4 + \frac{1}{6} B_3 t^3 + \frac{1}{2} B_4 t^2 + B_5 t + B_6, \end{aligned} \quad (6)$$

де $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ – постійні інтегрування, що визначаються за крайовими умовами руху.

У роботі [1] проведено дослідження кінематики руху стрілової системи з підвищеним вантажем за законом оптимізації середньоквадратичних відхилень швидкостей при наступних крайових умовах:

$$\begin{aligned} t = 0, x = x_0, \dot{x} = \dot{x} = 0; \\ t = t_1, x = x_1, \dot{x} = \dot{x} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

де x_0 – горизонтальна координата вантажу на початку руху стрілової системи; x_1 – горизонтальна координата вантажу в кінці руху; t_1 – тривалість руху.

Вказані крайові умови описують рух стрілової системи від мінімального значення вильоту до максимального. Однак, такий підхід показав неможливість практичного використання закону мінімізації швидкостей для керування електродвигуном механізму зміни вильоту. Це пов'язано з тим, що на початку та в кінці руху ШЗСС має місце деяке відхилення між швидкостями вантажу \dot{x} та кінцевої точки хобота \dot{x}_D (рис. 2) [1].

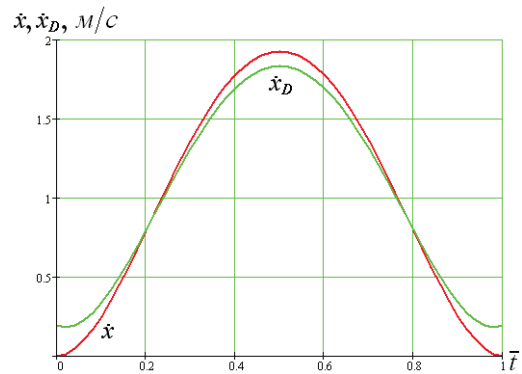


Рис. 2. Графіки зміни швидкостей.
Fig. 2. Graphs of velocities change.

Окрім того, з графіків на рис. 3 видно, що прискорення вантажу має більше значення в порівнянні зі значенням прискорення кінця хобота. Це говорить про те, що під час розгону стрілової системи та при гальмуванні вантаж рухається з натягом за кінцевою точкою хобота.

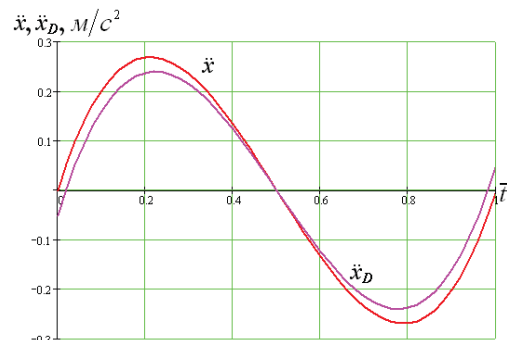


Рис. 3. Графіки зміни прискорень.
Fig. 3. Graphs of accelerations change.

Практична реалізація такого руху із вказаними крайовими умовами можлива, лише у тому випадку, коли сама стрілова система починає та завершує

рухатися раніше від вантажу. Це можливо у випадку послаблення натягу підвісного канату на початку руху. Зважаючи на це, можливість використання закону мінімізації швидкостей для керування електродвигуном механізму зміни вильоту з крайовими умовами (7) є суттєво обмеженою. Графіки наведені на рис. 2 та рис. 3 побудовані залежно від відносного часу руху стрілової системи.

Крайові умови, що забезпечують розгін стрілової системи на ділянці пуску мають вигляд:

$$\begin{aligned} t = 0, x = x_0, \dot{x} = \ddot{x} = 0; \\ t = t_1, \dot{x} = v, \ddot{x} = \ddot{x} = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

де v – швидкість горизонтального переміщення вантажу при усталеному русі.

При вказаних крайових умовах постійні інтегрування набувають таких значень:

$$\begin{aligned} B_1 = \frac{72v}{t_1^4}; B_2 = \frac{-48v}{t_1^3}; B_3 = \frac{12v}{t_1^2}; \\ B_4 = 0; B_5 = 0; B_6 = x_0. \end{aligned} \quad (9)$$

Після підстановки постійних інтегрування у систему (6), визначено такий режим руху вантажу, що забезпечує мінімальну середньоквадратичну різницю між швидкістю вантажу та швидкістю кінцевої точки хобота на ділянці розгону стрілової системи:

$$\begin{aligned} x &= R_0 + x_0 + \frac{3vt^5}{5t_1^4} - \frac{2vt^4}{t_1^3} + \frac{2vt^3}{t_1^2}; \\ \dot{x} &= \frac{3vt^4}{t_1^4} - \frac{8vt^3}{t_1^3} + \frac{6vt^2}{t_1^2}; \\ \ddot{x} &= \frac{12vt^3}{t_1^4} - \frac{24vt^2}{t_1^3} + \frac{12vt}{t_1^2}; \\ \ddot{\ddot{x}} &= \frac{36vt^2}{t_1^4} - \frac{48vt}{t_1^3} + \frac{12v}{t_1^2}; \\ x &= \frac{72vt}{t_1^4} - \frac{48v}{t_1^3}; \dot{x} = \frac{72v}{t_1^4}. \end{aligned} \quad (10)$$

На основі рівнянь (10) побудовано графіки залежності кінематичних характеристик вантажу та кінцевої точки хобота від часу (рис. 4 – рис. 6).

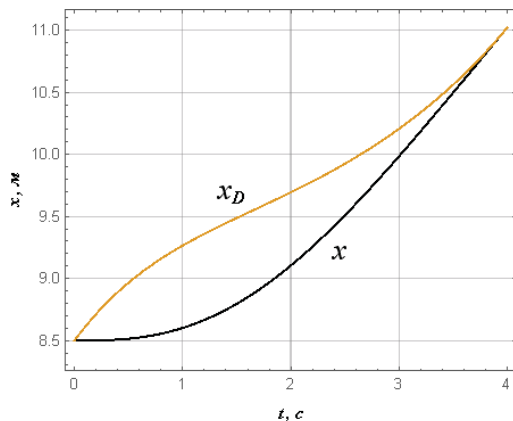


Рис. 4. Графіки зміни горизонтальних координат.
Fig. 4. Graphs of horizontal coordinates change.

Дослідження руху проведено при тривалості розгону, що становить 4 с. Така тривалість пуску

обумовлена результатами досліджень, що були проведені в роботах [2, 3]. В цих дослідженнях було встановлено, що при вказаній тривалості перехідного процесу коливання вантажу повністю усуваються, а швидкість досягає свого номінального значення горизонтального переміщення вантажу.

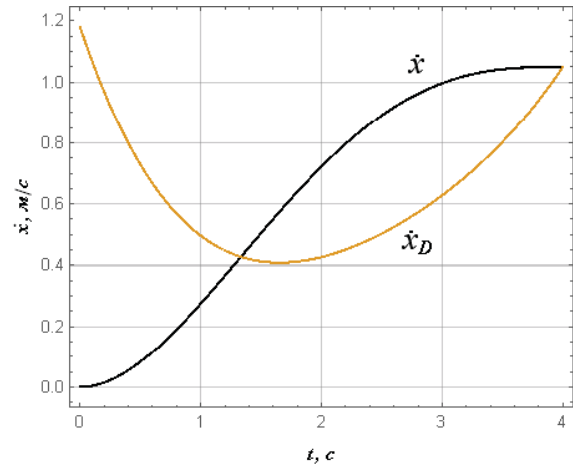


Рис. 5. Графіки зміни швидкостей.
Fig. 5. Graphs of velocities change.

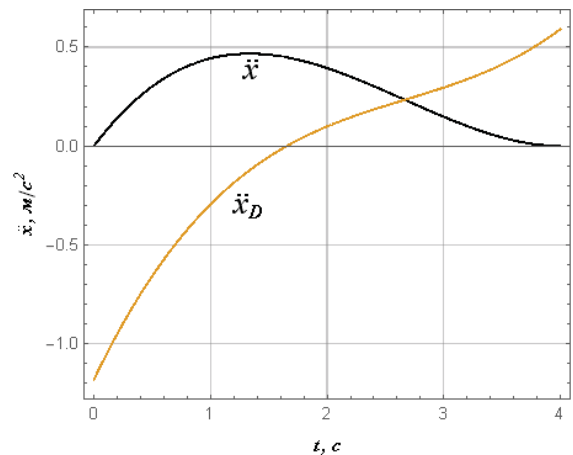


Рис. 6. Графіки зміни прискорень.
Fig. 6. Graphs of accelerations change.

Аналізуючи наведені на рис. 4 графіки, видно, що наприкінці пуску горизонтальна координата вантажу та горизонтальна координата кінцевого обвідного блока хобота рівні між собою, що говорить про повне затухання коливань вантажу. Однак, розглядаючи графіки зміни швидкостей на рис. 5, видно, що для плавного розгону вантажу від стану спокою до встановленої номінальної швидкості 1,05 м/с кінцева точка хобота на початку руху вантажу повинна мати деяку швидкість. Крім того, швидка зміна значення швидкості потребує знакозмінного прискорення, що підтверджується графіками на рис. 6. Знакозмінне прискорення призводить до виникнення різнонаправлених інерційних сил, що діють на ланки стрілової системи та приводу [6–9].

Тому для розгону стрілової системи пропонується використати крайові умови з керованим переміщенням. При таких крайових умовах горизонтальна координата вантажу є середнім переміщенням за час пуску t_1 :

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

$$t = t_1, x = \frac{vt_1}{2}, \dot{x} = v, \ddot{x} = 0, \quad (11)$$

При таких крайових умовах постійні інтегрування мають наступний вигляд:

$$B_1 = 0; B_2 = \frac{-12v}{t_1^3}; B_3 = \frac{6v}{t_1^2};$$

$$B_4 = 0; B_5 = 0; B_6 = x_0. \quad (12)$$

Після підстановки постійних інтегрування у систему (6), рівняння руху вантажу є такими:

$$x = R_0 + x_0 - \frac{vt^4}{2t_1^3} + \frac{vt^3}{t_1^2};$$

$$\dot{x} = -\frac{2vt^3}{t_1^3} + \frac{3vt^2}{t_1^2}; \ddot{x} = -\frac{6vt^2}{t_1^3} + \frac{6vt}{t_1^2};$$

$$\ddot{x} = -\frac{12vt}{t_1^3} + \frac{6v}{t_1^2}; \dot{x} = -\frac{12v}{t_1^3}; \ddot{x} = 0. \quad (13)$$

На основі рівнянь руху (13) побудовані графіки зміни горизонтальних координат, швидкостей та прискорень для вантажу та кінцевої точки хобота від тривалості розгону (рис. 7 – рис. 9).

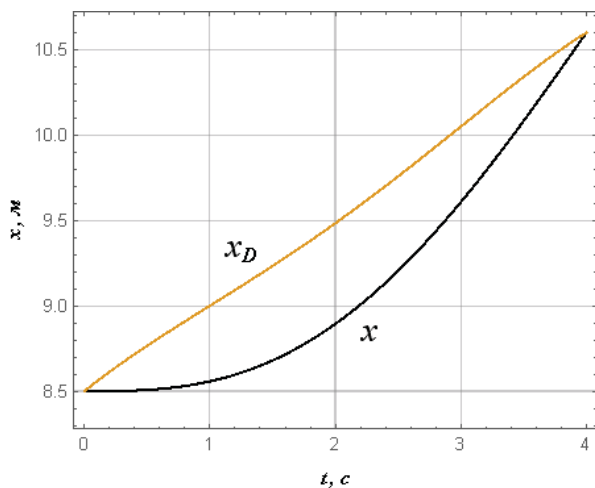


Рис. 7. Графіки зміни горизонтальних координат.
Fig. 7. Graphs of horizontal coordinates change.

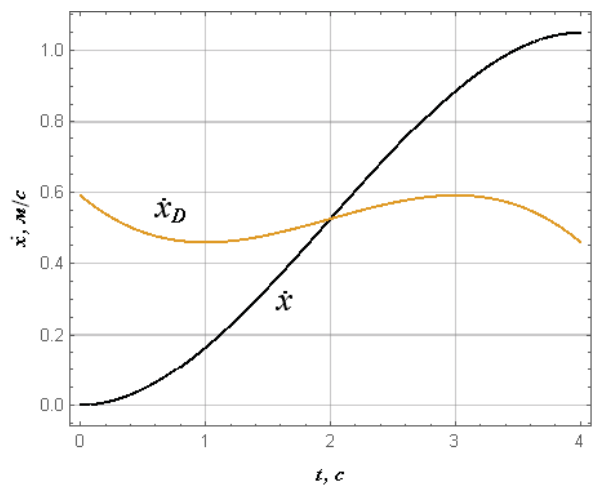


Рис. 8. Графіки зміни швидкостей.
Fig. 8. Graphs of velocities change.

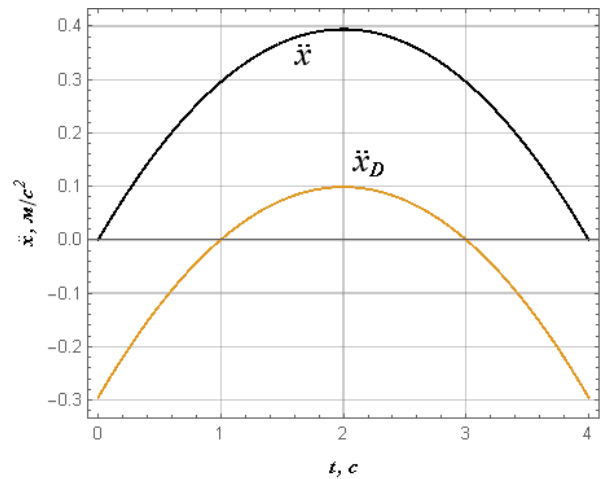


Рис. 9. Графіки зміни прискорень.
Fig. 9. Graphs of accelerations change.

З графіка на рис. 7 видно, що під час розгону стрілової системи зі стану спокою до усталеної швидкості має місце деяке відхилення вантажу від вертикалі в сторону протилежну до напрямку руху. Однак, при виході стрілової системи на усталену швидкість, розгойдування вантажу повністю усуваються. Зміна швидкості вантажу зі стану спокою до номінальної швидкості $\dot{x} = v = 1$ м/с має плавну характеристику (рис. 8). Але, при цьому, на початку розгону кінцева точка хобота повинна мати горизонтальну швидкість, що становить $\dot{x}_D = 0,6$ м/с. При цьому прискорення вантажу та кінцевої точки хобота змінюються за подібними законами, які зміщені по осі ординат на 0,3 м/с (рис. 9). Після виходу на усталену швидкість вантаж продовжує рухатися з постійною швидкістю.

Аналізуючи графіки зміни швидкостей та прискорень видно, що запропонований закон руху є сприятливим зі сторони зменшення інерційних навантажень на ланки. Це можливо завдяки тому, що зміна прискорення кінцевої точки хобота здійснюється плавно в невеликих межах [10–14]. Але, незважаючи на таку позитивну сторону, вказані закони руху (13) можуть бути використані лише при ослабленому вантажному канаті або ж при сумісній роботі механізму зміни вильоту та механізму підймання вантажу. Така ситуація дозволить наперед розпочати горизонтальне переміщення хобота, а вантаж буде переміщуватися при натязі канату.

Висновки

1. У роботі проведено дослідження кінематичних характеристик ШЗСС під час перехідного режиму пуску, який здійснюється за законами, що відповідають оптимізації режиму руху за критерієм середньоквадратичного значення швидкостей, яке показало можливість використання таких режимів руху стрілової системи в процесі пуску.

2. Використовуючи різні крайові умови для координати та швидкості вантажу, встановлено два закони руху, що забезпечують мінімізацію

середньоквадратичної різниці між швидкостями вантажу та осі кінцевого обвідного блоку хобота.

3.3 аналізу отриманих законів руху наведено рекомендації, щодо можливого практичного застосування таких режимів руху.

4. Встановлено, що найбільш сприятливим, з точки зору забезпечення плавності руху вантажу та зменшення навантажень на ланки стрілової системи, є закон, який забезпечує розгін стрілової системи до горизонтальної швидкості, що має усталене значення та середнє переміщення в кінці пуску.

5. Наведено рекомендації щодо можливого застосування визначених законів пуску на практиці в обмежених умовах експлуатації стрілових систем порталних кранів.

Список літератури

1. Ловеїкін В. С., Паламарчук Д. А. Оптимізація режимів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана. Монографія. Київ. ЦП „КОМПРИНТ”. 2015. 224 с.

2. 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.

3. Ловеїкін В. С., Паламарчук Д. А., Ромасевич Ю. О. Аналіз пуску шарнірно-зчленованої стрілової системи при оптимальному ривковому режимі руху. Machinery & energetics. Journal of rural production research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 4. P. 153-160.

4. Суглобов В. В., Михеев В. А., Ткачук Е. В. Оптимізація дійсуючих нагрузок на механізм изменения вылета стрелы с целью снижения энергопотребления порталного крана. Захист металургійних машин від поломок. 2013. Вип. 15. С. 133-140.

5. 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.

6. 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.

7. Ловеїкін 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.

8. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод. Справочник. Москва. Энергоатомиздат, 1988. 344 с.

9. Найденко Е. В. Управление электроприводом механизмов горизонтального перемещения с подвешенным грузом. Електромашинобудування та електрообладнання, 2007. № 69. С. 17-22.

10. 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.

11. Keqin L. I., Cuxiang J. 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. P. 301-304.

12. 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. P. 386-391.

13. 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. P. 515-531.

14. Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L., Ohienko M., Duczmal W., Potwora W., Titova L., Rogovskii I. Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines: monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. 164 p.

References

1. 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.

2. 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.

3. Loveikin V. S., Palamarchuk D. A., Romasevych Yu. O. (2020). Analysis of starting in horse head system at the optimal jerking mode of movement. Machinery & energetics. Journal of rural production research. Kyiv. Ukraine. 11(4). 153-160.

4. 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.

5. 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.

6. 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. 120.

7. 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.

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

9. 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.

10. *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.

11. *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.

12. *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." XII (10). 386-391.

13. *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.

14. *Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L., Ohienko M., Duczmal W., Potwora W., Titova L., Rogovskii I.* (2020). Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines: monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 164.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ПУСКА ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОЙ СТРЕЛОВОЙ СИСТЕМЫ КРАНА

*В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук, Ю. О. Ромасевич,
М. М. Балака*

Аннотация. В данной работе приведены результаты аналитического исследования кинематических характеристик шарнирно-сочлененной стреловой системы порталного крана в начале движения. Указанное исследование проведено на участке разгона электродвигателя механизма изменения вылета, от начала включения до достижения номинальной частоты вращения. При этом, номинальная частота вращения ротора электродвигателя соответствует рабочей скорости горизонтального перемещения груза. Разгон электродвигателя происходит по закону, что соответствует оптимизации среднеквадратичного отклонения скоростей груза и оси конечного обводного блока. Проведено исследование движения ШССС крана при пуске по закону оптимизации среднеквадратичного отклонения скоростей при различных краевых условиях. Построены графические зависимости кинематических характеристик груза и его точки подвеса на хоботе. Это позволяет установить возможность практического использования указанного закона. На основании исследований, разработаны рекомендации по выбору начальных и конечных краевых условий при разгоне двигателя механизма изменения вылета. Также проанализированы кинематические характеристики движения стреловой системы порталного крана при пуске по законам оптимизации среднеквадратичного отклонения ускорений и рывков и выполнено

сравнение с движением стреловой системы по закону оптимизации среднеквадратичного отклонения скоростей.

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

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

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

Abstract. This article presents the results of an analytical study of the kinematic characteristics of the articulated boom system of a portal crane at the start of movement. The specified study was carried out on the section of acceleration of the electric motor of the mechanism for changing the departure, from the beginning of switching on until the nominal speed is reached. In this case, the rated speed of the rotor of the electric motor corresponds to the working speed of the horizontal movement of the load. The acceleration of the electric motor occurs according to the law, which corresponds to the optimization of the root-mean-square deviation of the speeds of the load and the axis of the final bypass block. The study of the movement at start-up according to the law of optimization of the root-mean-square deviation of speeds under various boundary conditions was carried out. Graphical dependencies of the kinematic parameters of the load and its suspension point on the trunk are built. This makes it possible to establish the possibility of practical use of this law. Based on the research, recommendations have been developed for the selection of the initial and final boundary conditions during engine acceleration of the departure change mechanism. Also, the kinematic characteristics of the movement of the gantry crane boom system during launch were analyzed according to the laws of optimization of the root-mean-square deviation of accelerations and jerks, and a comparison was made with the movement of the boom system according to the law of optimization of the root-mean-square deviation of speeds.

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

В. С. Ловейкин ORCID 0000-0003-4259-3900.

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

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

М. М. Балака ORCID 0000-0003-4142-9703.

Зміст

1. Синтез оптимального керування системою „кран-вантаж” у вигляді зворотного зв’язку <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, В. В. Макарець, А. С. Поночовний</i>	5-10
2. Моделювання рідкотекучості та густини ливарних сталей <i>Є. Г. Афтандіяни, М. М. Круглій</i>	11-16
3. Сучасні тенденції розвитку логістичного ринку <i>О. М. Загурський</i>	17-24
4. Зусилля, необхідне для переміщення гнучкої смуги вгору по поверхні горизонтального циліндра <i>Т. М. Воліна, С. Ф. Пилипака</i>	25-29
5. Ефективність виробництва та застосування твердого біопалива в сільській місцевості <i>В. М. Поліщук, Д. А. Дерев’янка, Є. О. Дворник</i>	31-38
6. Аналіз пропускної здатності збирально-транспортного комплексу машин для виробництва буряків цукрових <i>С. Г. Фришев, М. П. Волоха, М. І. Ікальчик</i>	39-45
7. Оптимізація міського пасажирського маршруту методами ігрового моделювання <i>О. М. Загурський, А. Г. Кумейко, Ю. В. Шатківська</i>	47-54
8. Результати досліджень зміни крутного моменту роботи запобіжної муфти <i>О. М. Троханяк</i>	55-60
9. Обґрунтування зміни конструкції корпусу вакуумного насосу <i>В. С. Хмельовський, О. В. Сутковий</i>	61-66
10. Дослідження оптимального швидкісного режиму руху під час пуску шарнірно-зчленованої стрілової системи крана <i>В. С. Ловейкін, Д. А. Паламарчук, Ю. О. Ромасевич, М. М. Балака</i>	67-73
11. Дослідження динамічних та енергетичних процесів стрічкового конвеєра при керуванні від пристрою плавного пуску <i>Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, Р. А. Кульпін, К. Р. Пундик</i>	75-82
12. Правові аспекти проходження медоглядів працівниками транспортної галузі <i>Л. Е. Піскунова, Т. О. Зубок</i>	83-90
13. Прогнозування і оцінка показників надійності елементів машин за результатами багаторежимних випробувань <i>О. І. Алфьоров</i>	91-96
14. Визначення терміну служби інструменту залежно від основних властивостей матеріалів і умов обробки <i>С. В. Кюрчев, О. С. Колодій, В. О. Верхованцева, Л. М. Кюрчева</i>	97-101
15. Обґрунтування конструктивних параметрів зерної камери шнекового пресу <i>В. В. Дідур, Т. О. Кутковецька</i>	103-108
16. Внутрішнє кочення некруглих центроїд, утворених із дуг логарифмічної спіралі <i>Т. А. Кресан, С. Ф. Пилипака</i>	109-119
17. Вплив режимів пресування на фізико-механічні властивості антифрикційних полімерних покриттів <i>Р. М. Остапенко</i>	121-128
18. Концепція аналізу явно заданої функції вібрації синхронних різбових з’єднань сільськогосподарської техніки <i>Я. М. Михайлович, А. М. Рубець</i>	129-136

19. Моделі формування альтернатив інженерного менеджменту в методах підвищення виробництва зерна в сільськогосподарських підприємствах
І. Л. Роговський 137-146
20. Моделювання перехідних процесів динамічної моделі силової енергетичної установки машин для лісотехнічних робіт
Л. Л. Тітова 147-154

Contents

1. Synthesis of optimal closed-loop control of the system „crane-load” in the form of feedback <i>Yu. O. Romasevych, V. S. Loveikin, V. V. Makarets, A. S. Ponochovny</i>	5-10
2. Simulation of fluidity and density of cast steels <i>Y. G. Aftandiliants, M. M. Kruhliy</i>	11-16
3. Modern trends in development of logistics market <i>O. M. Zagurskiy</i>	17-24
4. Force required to move the flexible strip up surface of horizontal cylinder <i>T. M. Volina, S. F. Pylypaka</i>	25-29
5. Efficiency of production and application of solid fuels in rural areas <i>V. M. Polishchuk, D. A. Derevianko, Ye. O. Dvornyk</i>	31-38
6. Analysis of throughput rate of harvesting and transportation complex of machines for sugar beet production <i>S. G. Fryshev, M. P. Volokha, M. I. Ikalchik</i>	39-45
7. Optimization of urban passenger route by game simulation methods <i>O. M. Zagurskiy, A. G. Kumeiko, Y. V. Shatkivska</i>	47-54
8. Investigations results of change in torque of work of safety clutch <i>O. M. Trokhaniak</i>	55-60
9. Justification of change in case of vacuum pumps <i>V. S. Khmelovsky, O. V. Sutkovyi</i>	61-66
10. Analysis of starting in horse head system at optimal jerking mode of movement <i>V. S. Loveikin, D. A. Palamarchyk, Yu. O. Romasevych, M. M. Balaka</i>	67-73
11. Research of dynamic and energy processes of belt conveyors under control with soft starter <i>Yu. O. Romasevych, V. S. Loveikin, R. A. Kulpin, K. R. Pundyk</i>	75-82
12. Legal aspects of passing medical examinations by workers of transport industry <i>L. E. Piskunova, T. O. Zubok</i>	83-90
13. Prediction and evaluation of reliability indicators of machine elements by results of multi-mode tests <i>O. I. Alfyorov</i>	91-96
14. Determination of tool life depending on basic properties of material and processing conditions <i>S. V. Kiurchev, O. S. Kolodii, V. O. Verkholtantseva, L. M. Kiurcheva</i>	97-101
15. Substantiation of design parameters of screw press pressing chamber <i>V. V. Didur, T. O. Kutkovetska</i>	103-108
16. Internal rolling of non-circular centroids formed from the arcs of logarithmic spiral <i>T. A. Kresan, S. F. Pylypaka</i>	109-119
17. Effect of pressing modes on physical and mechanical properties of antifriction polymer materials <i>R. M. Ostapenko</i>	121-128
18. Concept of analysis of explicitly specified vibration function of synchronous threaded fasteners of agricultural machinery <i>Y. M. Mykhaylovych, A. M. Rubets</i>	129-136
19. Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises <i>I. L. Rogovskii</i>	137-146

20. Simulation of transitional processes of dynamic model of power energy installation of machines
for forestry works

L. L. Titova..... 147-154

Guidelines for authors (2021)

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), (% m³m⁻³ or (% gg⁻¹), Thermal conductivity (W m⁻¹K⁻¹).

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. (2021). 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 12

№ 1

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 16.01.2021
Формат 60×84/16
Наклад 100 прим.

Підписано до друку 16.01.2021
Папір офсетний.
Зам. № 0019 від 16.01.2021

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