

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ШЕВЧУК ОЛЕКСАНДР ГРИГОРОВИЧ

УДК 621.87

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ЗМІНИ ВИЛЬОТУ БАШТОВОГО КРАНА
З ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЮ СТІЛОВОЮ СИСТЕМОЮ**

05.05.05 – піднімально-транспортні машини

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України та Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Ловейкін Вячеслав Сергійович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
завідувач кафедри конструювання машин
і обладнання

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Вольченко Олександр Іванович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
професор кафедри механіки машин

кандидат технічних наук, доцент
Неженцев Олексій Борисович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри прикладної механіки

Захист відбудеться «30» червня 2016 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.06 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Генерала Родимцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «27» травня 2016 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. Л. Роговський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Баштові крани з шарнірно-зчленованою стріловою системою широко використовуються в цивільному і промисловому будівництві. Значний час роботи цих кранів займають перехідні режими. При розгоні або гальмуванні виникають коливання вантажу, які при висотному будівництві значно зменшують продуктивність роботи крана і становлять загрозу для життя стропувальників. Тому постає задача усунення коливань вантажу під час перехідних режимів руху. Перехідні режими руху впливають на динамічні та енергетичні характеристики роботи крана. Зміна вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою може виконуватись як механізмом переміщення стрілової системи, так і переміщенням вантажного візка. Крім того, зміна вильоту може виконуватись одночасно при роботі цих двох механізмів, що створює додаткові складнощі для розв'язання задачі щодо усуненню коливань вантажу.

Динамічні навантаження, які виникають при перехідних режимах руху, також мають значний вплив на надійність і довговічність роботи крана. Попередніми дослідженнями встановлено зв'язок між динамічними навантаженнями та ефективністю роботи крана. Тому вирішення задач оптимізації режимів зміни вильоту баштових кранів з шарнірно-зчленованою стріловою системою дасть можливість підвищити їх ефективність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з науково-дослідними тематиками кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України: «Оптимізація режимів руху механізмів підйомно-транспортних машин, що використовуються при механізації виробничих процесів у тваринництві і рослинництві» (номер державної реєстрації 0105U007502); «Розробка енергоощадних засобів та методів оптимізації режимів руху вантажопідйомних машин у сільськогосподарському виробництві» (номер державної реєстрації 0109U000953).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності баштових кранів з шарнірно зчленованою стріловою системою шляхом оптимізації режиму зміни вильоту та розробки системи керування приводними механізмами.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- проаналізувати існуючі дослідження з динаміки та оптимізації режимів руху механізмів зміни вильоту баштових кранів та визначити задачі досліджень;

- побудувати математичну модель динаміки зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою;

- проаналізувати динамічні навантаження в елементах баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою при роботі його приводних двигунів на природних механічних характеристиках;

- визначити оптимальні режими руху механізмів підйому стрілової системи та переміщення вантажного візка за кінематичними, динамічними та енергетичними критеріями;

- розробити методику та провести експериментальні дослідження динаміки руху на побудованій лабораторній установці баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою при ручному та оптимальному керуванні;

- обґрунтувати структуру та алгоритм роботи системи керування приводними механізмами баштового крана із використанням оптимальних режимів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка.

Об'єкт дослідження – процес переміщення вантажу при роботі механізмів підйому стрілової системи та переміщення вантажного візка баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою.

Предмет дослідження – встановлення закономірностей зміни режимів руху на природній та оптимальних механічних характеристиках механізмів підйому стрілової системи та переміщення вантажного візка на ефективність баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою.

Методи дослідження. При виконанні досліджень було використано методи теоретичної та аналітичної механіки, теорії механізмів і машин, варіаційного, диференціального та інтегрального числення, методи математичного моделювання та статистики. Розв'язування задач оптимального керування рухом механізмів переміщення стрілової системи та вантажного візка проведено із використанням класичного варіаційного числення. Теоретичні розрахунки проводились за допомогою програми Wolfram Mathematica. Експериментальні дослідження проводились на фізичній моделі крана, яка знаходиться в лабораторії динаміки машин кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України при використанні сертифікованого обладнання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

уперше:

- розроблено математичну модель динаміки зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою при сумісній роботі механізмів підйому стріли та переміщення вантажного візка, за допомогою якої визначено динамічні та кінематичні характеристики режиму зміни вильоту реальної конструкції баштового крана;

- на основі кінематичних, динамічних та енергетичних інтегральних критеріїв оптимізовано режими зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою, що дозволило усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі, а також зменшити динамічні навантаження в елементах конструкції крана та приводів;

- оцінено вплив тривалості розгону на якість реалізації оптимальних режимів зміни вильоту шарнірно-зчленованої системи та встановлено час розгону при якому відсутній зворотний рух стрілової системи;

удосконалено:

- метод визначення режимних параметрів для оптимального закону зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами досліджень:

- розроблено оптимальні режими руху стрілової системи та вантажного візка, які дозволяють усунути коливання вантажу та зменшити динамічні

зусилля в приводі візка і, як наслідок, підвищити ефективність роботи крана в цілому;

- розроблено програмне забезпечення «ВВК», що дозволяє реалізовувати оптимальні закони руху стрілової системи та вантажного візка в процесі зміни вильоту вантажу.

Результати досліджень передано до впровадження у: ТОВ «Червона волока», ТОВ «Нива», ПП «Велідницьке». Частина положень дослідження використовується у навчальному процесі Національного університету біоресурсів і природокористування України при викладанні дисциплін «Динаміка і оптимізація машин» та «Мехатронні системи в будівництві».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи виконано здобувачем особисто. Зокрема: проаналізовано конструкції стрілових систем та систем керування баштових кранів [14, 9]; проведено аналіз динаміки зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою та побудовано відповідні математичні моделі [1, 22]; обрано метод оптимізації та визначено оптимальні режими руху механізмів стрілової системи та вантажного візка, що усувають коливання вантажу при перехідних процесах [26, 1, 13]; для проведення експериментальних досліджень розроблено фізичну модель баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою [28], підбрано вимірювально-реєструюче обладнання [8] та проведено експериментальні дослідження, що підтверджують адекватність теоретичних розрахунків [12].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідались і отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції та перспективи розвитку збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві» (м. Ніжин, 2015 р.); XVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2015 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Буд-Майстер-Клас-2015» (м. Київ, 2015 р.); XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (смт Глеваха, 2013 р.); 72-й науково-практичній конференції Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2011 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Еколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве» (м. Вороніж, Російська Федерація, 2014 р.); науково-практичній конференції «Високі технології в аграрному виробництві» (м. Київ, 2013 р.); 14-й спеціалізованій виставці-ярмарку «Україна аграрна – 2014» (м. Київ, 2014 р.); виставці-ярмарку «Овочі та фрукти – 2013» (м. Київ, 2013 р.); 9 Міжнародній агропромисловій виставці «ІнтерАгро» (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній виставці проектування, будівельних технологій, машин, обладнання і будівельних матеріалів «Проектування, будівництво, ремонт 2014» (м. Київ, 2014 р.); Національній агропромисловій виставці «AgroExpo» (м. Кіровоград, 2015 р.); VIII Міжнародній виставці «LabComplex» (м. Київ, 2015 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні дослідження в будівельному та сільськогосподарському машинобудуванні» (м. Рівне, 2015 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладено у 30 опублікованих працях, із яких 9 статей у наукових фахових виданнях України, 5 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародної наукометричної бази даних, стаття у науковому виданні іншої держави, 3 патенти України на корисну модель, науковий твір та 11 матеріалів і тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел. Основна частина роботи складає 170 сторінок, на 17 сторінках наведено список використаних джерел, на 32 сторінках викладено додатки. Текст містить 15 таблиць, 68 рисунків. До списку використаних джерел увійшло 167 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Літературний огляд та обґрунтування напрямів досліджень» проведено аналіз конструкцій стрілових систем баштових кранів, динамічних навантажень в елементах баштових кранів при русі стрілових систем та аналіз математичних моделей їхнього руху. Проведено також аналіз оптимізаційних задач та методик їх вирішення. Наведено системи керування крановими механізмами для усунення коливань вантажу.

Баштові крани оснащені підйомною, балочною, шарнірно-зчленованою та телескопічною стріловими системами. Розробкою баштових кранів з шарнірно-зчленованою стріловою системою займалися такі фірми як Kaiser, Liebherr, Pocco, Tornborgs, ВКТ, Krøll, Cobra та ін.

Дослідженнями динамічних процесів, які відбуваються при зміні вильоту стрілових систем баштових кранів займалися такі вчені: М. М. Гохберг, С. А. Казак, М. С. Комаров, В. Ф. Гайдамака, Н. А. Лобов, Б. Є. Горський, В. С. Ловейкін, Л. Н. Поляков, О. В. Григоров, В. Ф. Семенюк, О. І. Вольченко, В. П. Мисюра, Д. А. Паламарчук, A. Karpe, A. Chawrai, I. Gerdemeli, F. Ju, Y. S. Choo, L. Wei, W. Blajer, A. H. Nayfeh, E. Abdel-Rahman, W. Yang, Z. Zhang, R. Shen, W. S. M. Lau, K. H. Lowt та ін.

Задачі оптимізації режимів руху механізмів баштових, поворотних, стрілових кранів розглянуто в роботах: Л. Д. Черноуська, М. М. Перельмутера, Ю. И. Акуленка, Ф. Л. Зайцева, М. І. Єрофєєва, А. О. Смехова, Р. П. Герасимьяка, В. С. Ловейкіна, О. В. Григорова, О. М. Орлова, Ю. О. Ромасевича, Ю. В. Човнюка, Л. Я. Будікова, О. Б. Неженцева, A. R. Golafshani, J. D. Aplevich, A. Z. Al-Garni, K. A. F. Moustafa, T. Yoshimoto, Y. Sakawa, J. W. Auering, H. Troger, G. A. Manson, W. Solarz, J. W. Auernig, H. Troger, L. A. Scardua та ін.

Розробкою систем керування механізмами баштових кранів займалися такі вчені: О. В. Григоров, Р. П. Герасимьяк, Ю. О. Ромасевич, В. П. Свіргун, А. В. Бойко, A. R. Golafshani, G. A. Manson, Y. Sakaw, Y. Shindo, Z. N. Masoud, B. Balachandran, W. Jason, H-H. Lee, S-K. Cho, A. Al-Moussa, Wu. Tzu-Sung, Z. N. Masoud, H. M. Omar, A. H. Nayfeh та ін.

Разом з тим питанням динаміки та оптимізації режимів зміни вильоту при сумісній роботі механізмів переміщення шарнірно-зчленованої стрілової

системи і вантажного візка вивчено недостатньо. Тому ці задачі є актуальними та стали предметом досліджень дисертаційної роботи.

У другому розділі «Динамічний аналіз зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою» проведено динамічний аналіз зміни вильоту. Для проведення динамічного аналізу зміни вильоту прийнято динамічну модель шарнірно-зчленованої стрілової системи (рис. 1), що являє собою механічну систему з трьома ступенями вільності, де за узагальнені координати прийнято кутову координату повороту основної секції стрілової системи α , і лінійні координати центрів мас переміщення вантажного візка x_1 і вантажу x . Припускаємо, що всі ланки стрілової системи абсолютно жорсткі і рухаються у вертикальній площині, канати абсолютно гнучкі, нерозтяжні та невагомі, тертям в кінематичних парах нехтуємо, також не враховуємо зазори в кінематичних парах. Для моделювання приводних зусиль використовуються статичні механічні характеристики приводних асинхронних електродвигунів.

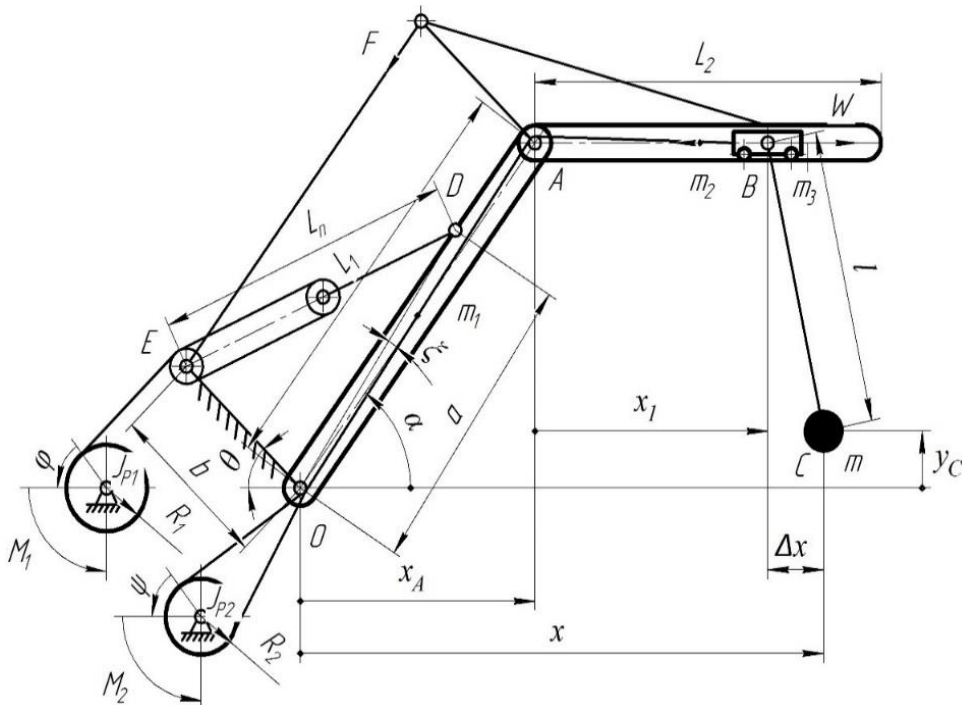


Рис. 1. Розрахункова динамічна модель зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою

Тут m_1, m_2 – відповідно маси основної та допоміжної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи; m_3 – маса вантажного візка; m – маса вантажу; J_{P1}, J_{P2} – відповідно зведені до осей приводних барабанів моменти інерції механізмів переміщень стрілової системи та вантажного візка; M_1, M_2 – відповідно рушійні моменти зведені до барабанів приводів переміщень стрілової системи та вантажного візка; φ, ψ – відповідно кутові координати поворотів барабанів приводів переміщення стрілової системи і вантажного візка; R_1, R_2 – відповідно радіуси барабанів приводів переміщення стрілової системи і вантажного візка; L_1, L_2 – відповідно довжини основної та допоміжної секції стрілової системи; L_n – довжина поліспасти; b – довжина стояка OE ; θ – кут нахилу стояка до горизонталі; ξ – кут між прямими OA і OD ;

a – довжина прямої OD ; W – сила опору переміщенню вантажного візка; F – сила натягу у відтяжці.

На основі представленої динамічної моделі за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду побудовано математичну модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(J_1 + L_1^2 \cdot (m \cdot \cos^2(\alpha) + m_2 + m_3) + J_{p1} \left(\frac{\partial \varphi_p}{\partial \alpha} \right)^2 \right) \cdot \ddot{\alpha} + \\ - L_1 m_3 \sin(\alpha) \ddot{\alpha} + \left(L_1^2 m \cdot \cos(\alpha) \sin(\alpha) - J_{p1} \frac{\partial \varphi_p}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial \alpha^2} \right) \ddot{\alpha} = \\ = M_{p1} \cdot \eta \cdot \frac{\partial \varphi_p}{\partial \alpha} - M_o; \\ L_1 m_3 \sin(\alpha) \ddot{\alpha} - \left(m_3 + J_{p2} \left(\frac{\partial \psi_p}{\partial x_1} \right)^2 \right) \ddot{\alpha} + L_1 m_3 \cos(\alpha) \ddot{\alpha} - \\ - J_{p2} \frac{\partial \psi_p}{\partial x_1} \frac{\partial^2 \psi_p}{\partial x_1^2} = M_{p2} \cdot \eta \cdot \frac{\partial \psi_p}{\partial x_1} + mg \frac{x - L \cdot \cos(\alpha) - x_1}{l} - W; \\ \ddot{\alpha} = -g \frac{x - L \cdot \cos(\alpha) - x_1}{l}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Система диференціальних рівнянь (1) розв'язана чисельним методом за таких значень параметрів крана Liebherr 140hc-k: $m_1 = 5500$ кг; $m_2 = 2500$ кг; $m_3 = 500$ кг; $J_{p1} = 25$ кг·м²; $J_{p2} = 2$ кг·м²; $L_1 = 24,1$ м; $L_2 = 26$ м; $R_1 = 0,5$ м; $R_2 = 0,2$ м; $L_{n\max} = 28,67$ м; $l = 20$ м; $a = 19,92$ м; $b = 11,1$ м; $\theta = 0,785$ рад; $W = 850$ Н; $n = 8$; $u = 38,98$; $g = 9,8$ м/с². Маса вантажу m приймалася максимальною для заданого вильоту і змінювалась в межах 1700–12000 кг.

Використовуючи математичну модель (1), проведено триетапний динамічний аналіз зміни вильоту, який виконувався за рахунок переміщення стрілової системи та за рахунок сумісного переміщення стрілової системи і вантажного візка. На першому етапі «розгін-усталений рух» рушійні моменти M_{p1} та M_{p2} визначались зі статичних механічних характеристик асинхронних електродвигунів. На другому етапі «гальмування» у математичній моделі рушійні моменти замінювались на постійні гальмівні моменти, знаки яких залежать від напрямків руху основної секції стрілової системи та вантажного візка відповідно. На третьому етапі оцінювались залишкові коливання вантажу, які описуються третім рівнянням системи (1). Для об'єднання розв'язків вважалось, що початкові умови руху наступного етапу є кінцевими умовами руху попереднього.

Проведені серії трифакторних розрахункових досліджень з динамічного аналізу зміни вильоту, де за незалежні фактори прийнято положення основної секції стрілової системи ($\alpha_0 = 0; \pi/4; \pi/2; \text{рад}$), напрямок її руху та тривалість усталеного руху. Тривалість руху стрілової системи T_n визначалась за формулою:

$$T_n = 2\pi \sqrt{l/g} \cdot n/4, \quad (2)$$

де $n(1:16), n \in N$.

Всього проведено 128 розрахункових досліджень.

В результаті розв'язку математичної моделі побудовано графіки кінематичних та динамічних характеристик руху (рис. 2–5). Суцільною лінією зображено етап «розгін-усталений рух», штрих-пунктирною – етап «гальмування», та пунктирною зображено залишкові коливання вантажу після зупинки.

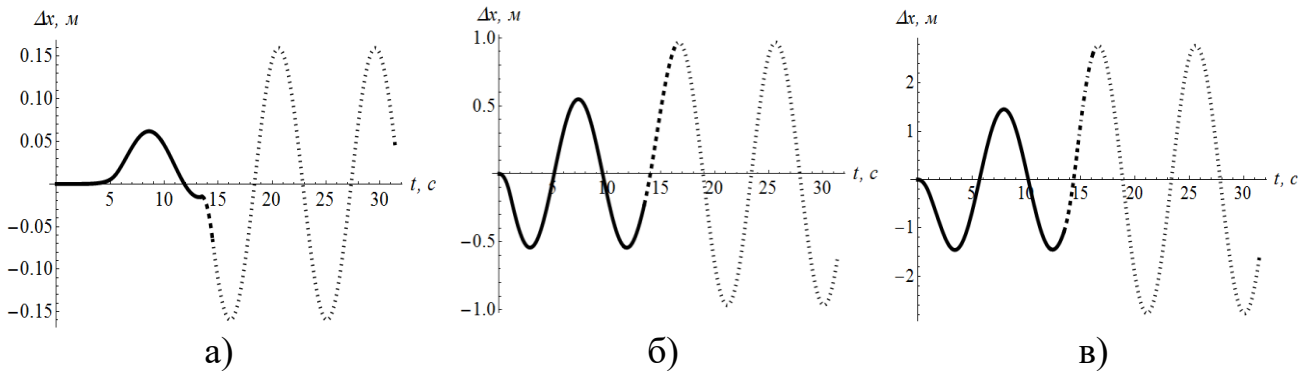


Рис. 2. Графіки відхилень вантажу відносно точки підвісу у розрахункових дослідях № 1 (а), № 04 (б) та № 8 (в) при тривалості руху $T=T_6$

Мінімальна амплітуда коливань вантажу при усталеному русі має місце при підйомі стрілової системи з крайнього нижнього положення і дорівнює 0,062 м (рис. 2, а). Максимальна амплітуда коливань вантажу при усталеному русі спостерігається при опусканні стрілової системи з крайнього верхнього положення (рис. 2, б) і рівна 0,543 м. При зміні вильоту за рахунок переміщення стрілової системи та вантажного візка значення амплітуди коливань вантажу при усталеному русі в залежності від початкового положення стрілової системи змінюється від 0,982 м до 1,458 м. Максимальна амплітуда коливань вантажу при усталеному русі виникає при опусканні стрілової системи з початкового положення $\alpha_0 = \pi/2$ та переміщенні вантажного візка в крайнє дальнє положення і становить 2,774 м (рис. 2, в).

З рис. 3, а, видно, що коливання вантажу впливають на усталений рух стрілової системи. Під час пуску початкове значення прискорення стрілової системи не нульове, що свідчить про те, що в системі приводу підйому стрілової системи має місце м'який удар (рис. 3, б).

Під час пуску стрілової системи виникає стрибок рушійного моменту, що пояснюється механічною характеристикою асинхронного електродвигуна з фазовим ротором. Середньоквадратичне значення рушійного моменту приводного двигуна механізму переміщення стрілової системи змінюється в межах 1422,6–1513,3 Нм. Мінімальне значення рушійного моменту спостерігається в досліді № 4 при опусканні стрілової системи з початкового положення $\alpha_0 = \pi/4$, а максимальне у досліді № 1 при підйомі стрілової системи з початкового положення $\alpha_0 = 0$. На рис. 4 показано зміну рушійного моменту механізму переміщення стрілової системи у досліді № 3 (а) та № 1 (б) при тривалості руху $T=T_6$.

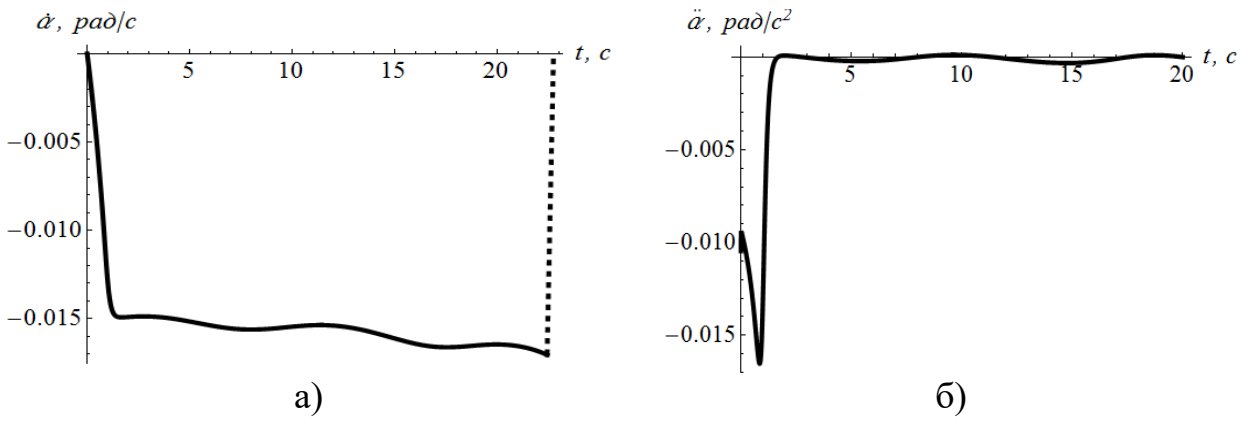


Рис. 3. Кутові швидкість (а) та прискорення (б) основної секції стрілової системи

Максимальні значення рушійного моменту не змінюється у всіх дослідах і становить 2261,8 Нм, це пояснюється конструкцією електродвигуна.

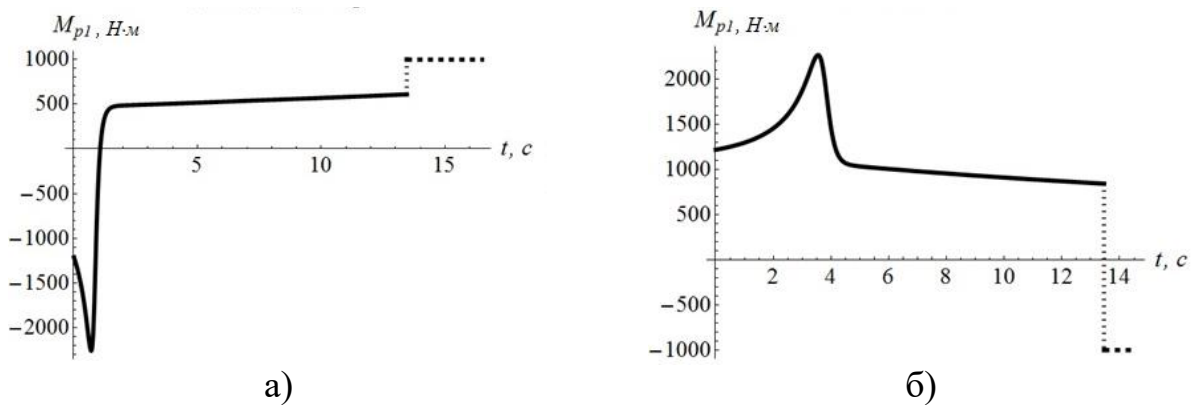


Рис. 4. Графіки зміни рушійного моменту приводного двигуна механізму переміщення стрілової системи протягом всього циклу руху

Середньоквадратичне значення рушійного моменту приводного двигуна механізму переміщення вантажного візка практично не змінюється в залежності від початкового положення стрілової системи 105,1–105,2 Нм. Таку незначну зміну можна пояснити тим, що зовнішні зусилля опору, що діють на візок, у дослідах майже не змінюються.

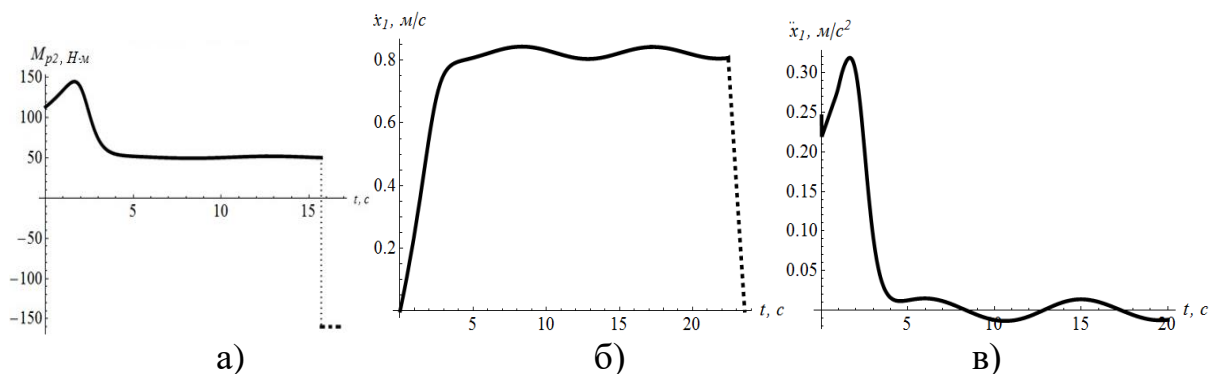


Рис. 5. Графіки зміни рушійного моменту приводного двигуна механізму переміщення вантажного візка протягом всього циклу руху (а), швидкості (б) та прискорення вантажного візка (в)

Пусковий рушійний момент приводного двигуна механізму переміщення вантажного візка приблизно втричі більший від усталеного значення (рис. 5, а).

Швидкість та прискорення вантажного візка під час усталеного руху мають коливальний характер (рис. 5, б, в). Під час пуску прискорення змінюється стрибкоподібно (рис. 5, в).

У третьому розділі «**Оптимізація зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою**» розв'язано оптимізаційні задачі зміни вильоту баштового крана за рахунок переміщення стрілової системи та сумісного переміщення стрілової системи і вантажного візка за кінематичними динамічними та енергетичними критеріями. Встановлено вплив параметрів динамічної системи «візок-вантаж» на оптимальний динамічний режим руху. Проведено моделювання оптимального режиму руху стрілової системи за скалярним керуванням приводного двигуна механізму переміщення стрілової системи протягом всього циклу руху.

Для усунення коливань вантажу під час розгону шарнірно-зчленованої стрілової системи і вантажного візка вибрано інтегральні критерії, які зводять до мінімуму різницю між прискореннями різних порядків вантажу та точки підвісу вантажу. Ці критерії представлено у вигляді середньоквадратичних відхилень прискорень та ривків:

$$\Delta_{C.K.B}^{\ddot{x}} = \left[\frac{1}{t_{p1}} \int_{t_0}^{t_{p1}} \Delta_{C.K.B}^{\ddot{x}} dt \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$\Delta_{C.K.B}^{\dot{x}} = \left[\frac{1}{t_{p1}} \int_{t_0}^{t_{p1}} \Delta_{C.K.B}^{\dot{x}} dt \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де t – час; t_0 – початковий момент часу руху; t_{p1} – кінцевий момент часу руху; $\Delta_{C.K.B}^{\ddot{x}}$, $\Delta_{C.K.B}^{\dot{x}}$ – відповідно відхилення прискорень і ривків центрів мас візка і вантажу.

Умовою мінімуму критеріїв (3) і (4) є рівняння Пуассона, які у даному випадку дають змогу знайти загальний розв'язок варіаційних задач, що представлено у вигляді графіків (рис. 6). Суцільною чорною лінією зображено розв'язки за критерієм (3), а штриховою – за критерієм (4).

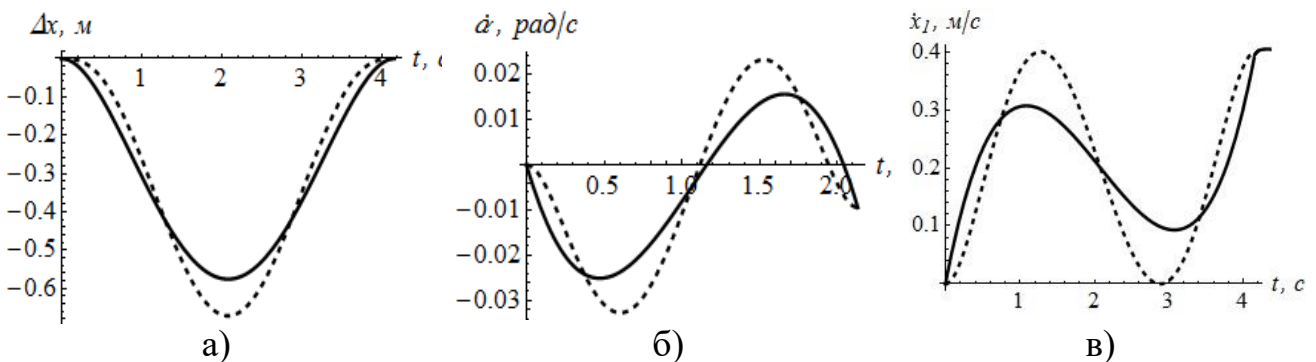


Рис. 6. Графіки зміни відхилення вантажу від точки підвісу (а), швидкостей основної секції стрілової системи (б) і вантажного візка (в)

Для заданих довжини підвісу вантажу, ustalеної швидкості руху стрілової системи та початкового положення основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи визначено мінімальний час розгону, при якому швидкість основної секції стрілової системи не змінює напрямку руху для усунення коливань вантажу.

На рис. 7 показано зміну швидкостей основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи, які знайдено шляхом розв'язання оптимізаційних задач за критеріями (3) (рис. 7, а) та (4) (рис. 7, б) при різних значеннях тривалості розгону.

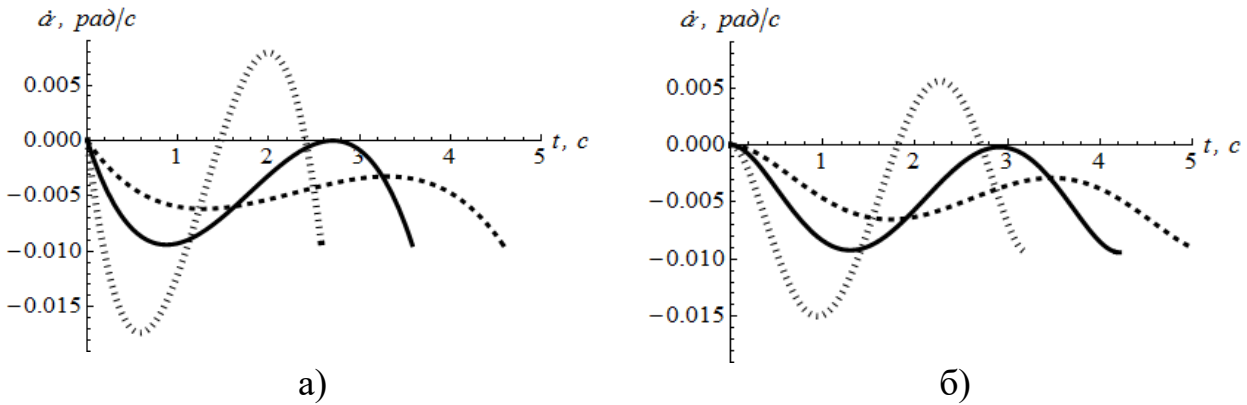


Рис. 7. Графіки зміни швидкості основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи під час розгону за оптимальним законом, який відповідає критеріям (3) (а) та (4) (б)

Розв'язано також оптимізаційну задачу руху шарнірно-зчленованої стрілової системи, де за критерій оптимізації прийнято середньоквадратичне значення моменту приводу M_α зведеного до основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи при зміні вильоту протягом розгону тривалістю t_p :

$$M_{c.k} = \left[\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} M_\alpha^2 dt \right]^{1/2} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Цю задачу розв'язано прямим варіаційним методом за умови руху основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи, при якій коливання вантажу усуваються в кінці розгону. На рис. 8 представлено оптимальні кінематичні характеристики основної секції стрілової системи.

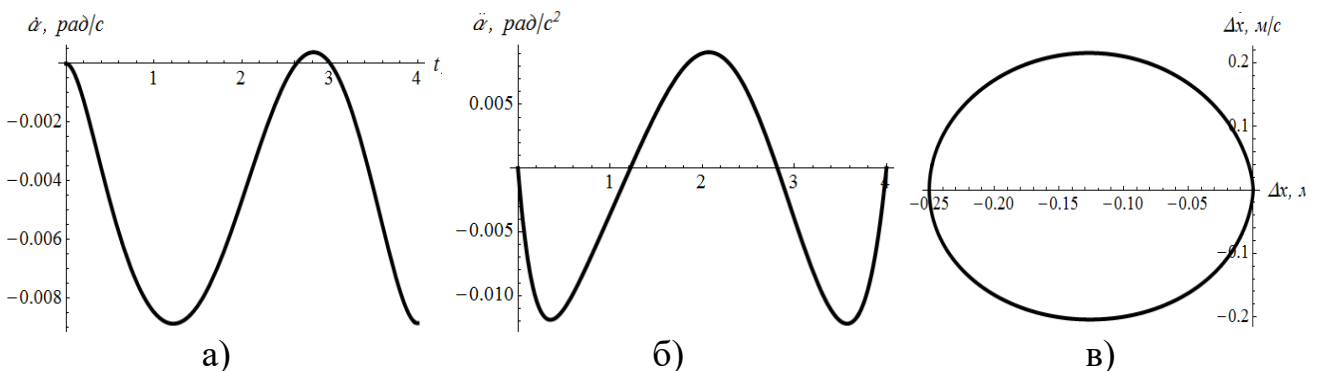


Рис. 8. Графіки зміни швидкості (а) та прискорення (б) основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи, фазовий портрет руху вантажу (в)

Для режиму зміни вильоту при переміщенні вантажного візка за критерій оптимізації прийнято середнє значення динамічної складової потужності приводу протягом розгону:

$$I_V = \int_0^{t_p} V dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

де V – «енергія» прискорень вантажного візка.

Розв'язком оптимізаційної задачі за критерієм (6) є наступне рівняння:

$$x^{VIII} + 2k^2 x^{VI} + (1 + \bar{m})k^4 x^{IV} = 0, \quad (7)$$

де k – частота власних коливань системи; \bar{m} – відношення маси вантажу до маси візка.

На рис. 9 представлено графіки швидкості вантажного візка і вантажу при визначеному режимі пуску для різних значень k та \bar{m} .

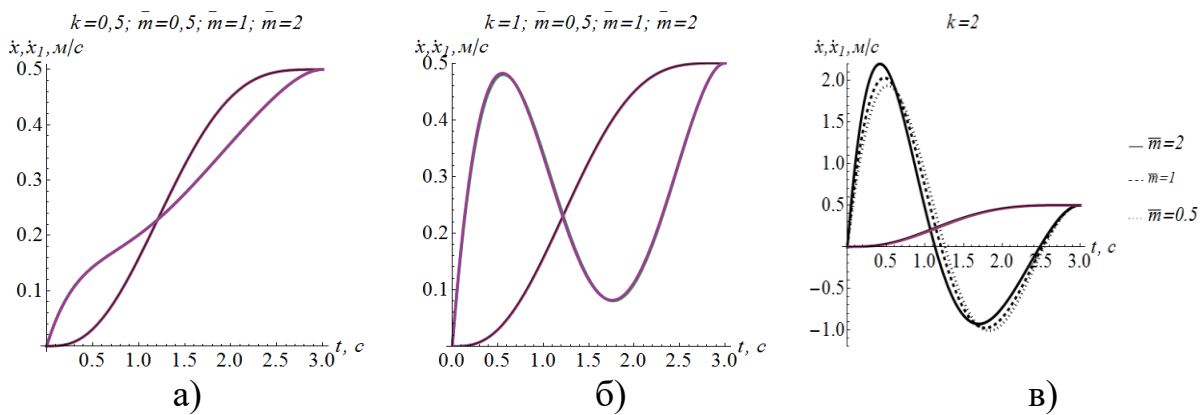


Рис. 9. Графіки зміни швидкості візка та вантажу при різних значеннях параметрів k та \bar{m}

Як видно з графіків (рис. 9) відношення між масами вантажного візка та вантажу впливають на оптимальний режим руху вантажного візка. Існують такі співвідношення між тривалістю розгону візка та частотою власних коливань маятника, при якому виникає реверсний рух вантажного візка (рис. 9, в).

Розв'язано також оптимізаційну задачу сумісного переміщення стрілової системи та вантажного візка протягом всього циклу руху за енергетичним критерієм:

$$I = \left[\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} (M_\alpha \ddot{\alpha} + P\ddot{x})^2 dt \right]^{1/2} \rightarrow \min, \quad (8)$$

де t – час; t_p – кінцевий момент часу руху; M_α – рушійний момент прикладений до основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи; P – рушійна сила прикладена до вантажного візка.

Задачу розв'язано методом колокацій для ділянок розгону та гальмування, результати якої представлено на рис. 10.

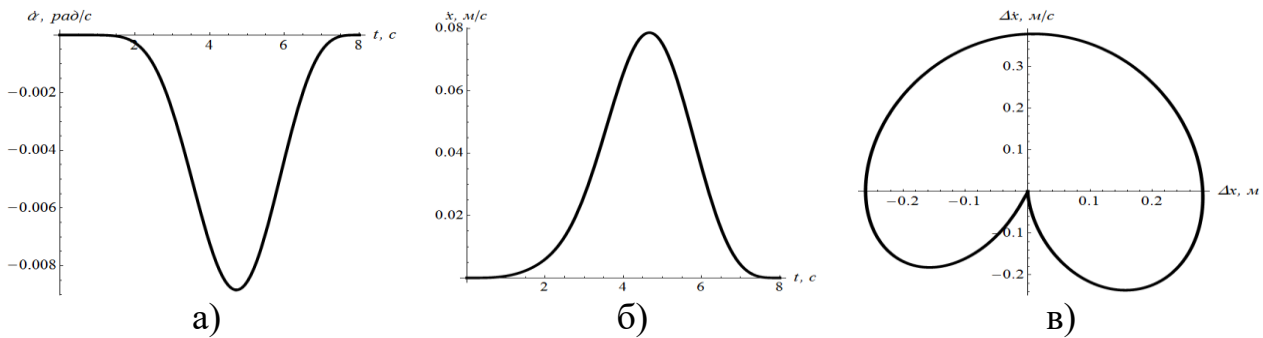


Рис. 10. Графіки зміни швидкостей основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи (а), вантажного візка (б) та фазовий портрет руху вантажу (в)

Як показують проведені дослідження усі оптимальні режими руху забезпечують усунення коливань вантажу та значно зменшують максимальні значення рушійних моментів приводів. Тому проведено моделювання оптимальних режимів руху стрілової системи тільки за кінематичними критеріями. На рис. 11, а показано два графіки коливань вантажу протягом всього циклу руху шарнірно-зчленованої стрілової системи. Пунктирною лінією зображено природний режим руху, а суцільною оптимальний змодельований за скалярним керуванням. Як видно з цих графіків при оптимальному керуванні коливання вантажу після розгону незначні, проте повністю не усуваються. Це пояснюється неточністю відтворення оптимального режиму руху (рис. 11 б).

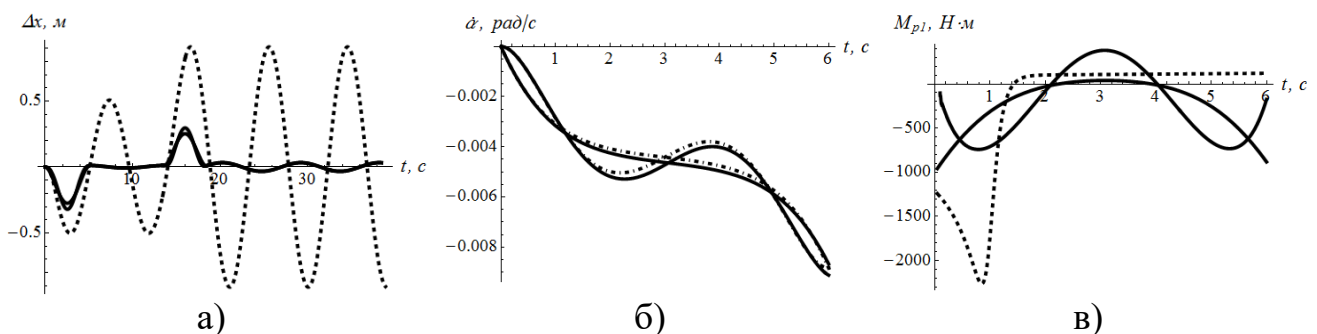


Рис. 11. Графіки відхилення вантажу відносно точки підвісу (а), швидкості основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи (б) та рушійного моменту приводного двигуна механізму переміщення стрілової системи (в) під час пуску за природнім та оптимальними режимами руху

Максимальні значення рушійних моментів при оптимальних режимах руху стрілової системи приблизно вдвічі нижчі ніж за природним режимом руху (рис. 11 в). Проте для виходу на номінальну швидкість за оптимальними режимами руху необхідно збільшити тривалість розгону, щоб забезпечити реалізацію оптимального режиму руху за скалярним керуванням.

У четвертому розділі «Програма і методика проведення експериментальних досліджень» визначено параметри, за якими створено фізичну модель шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана (рис. 12).

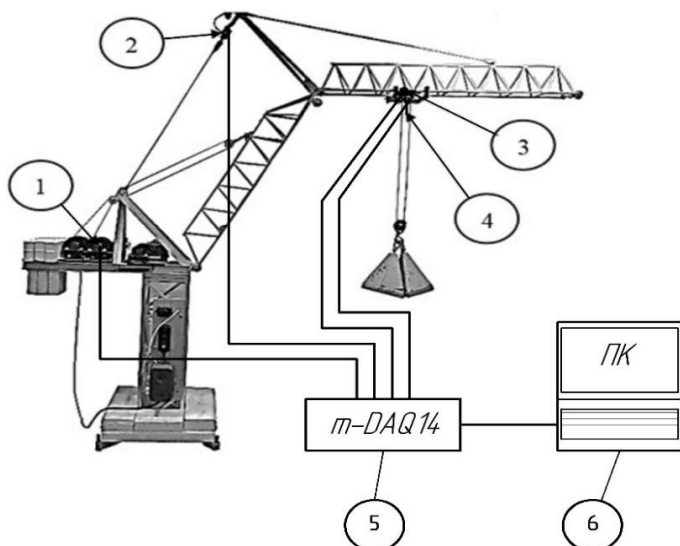


Рис. 12. Фізична модель шарнірно-зчленованої стрілової системи крана Liebherr 140hc-k: 1 – датчик кута повороту барабана механізму підйому стрілової системи; 2 – датчик зусилля; 3 – датчик положення візка; 4 – датчик кута відхилення канату від вертикалі; 5 – аналого-цифровий перетворювач; 6 – комп'ютер.

ENC Autonics (рис. 14), який шарнірно закріплений на візку таким чином, що колесо датчика вільно перекочується по нижньому поясу допоміжної секції стрілової системи.

Все електричне обладнання для керування рухом приводних двигунів зібрано у електрощиті (рис. 15). Для керування приводними електродвигунами використано частотні перетворювачі FR-S540 та FR-E700 фірми Mitsubishi Electric. Керування роботою частотних перетворювачів виконується за допомогою мікроконтролера Cortex M2F фірми Texas Instruments. Зв'язок між мікроконтролером та частотними перетворювачами виконується за допомогою перетворювача інтерфейсів UART/RS-485.

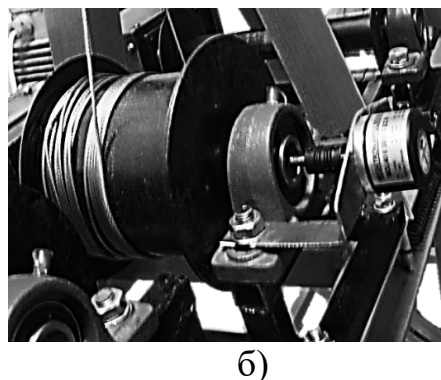
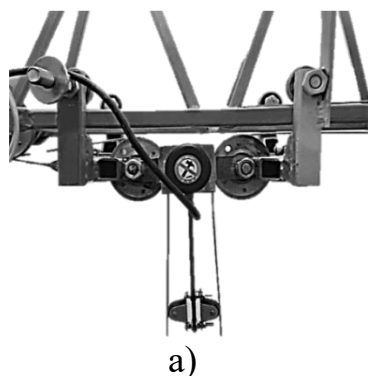


Рис. 13. Монтаж датчиків на фізичній моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи: а) для визначення відхилень вантажу; б) для визначення переміщення та швидкості обертання барабана.

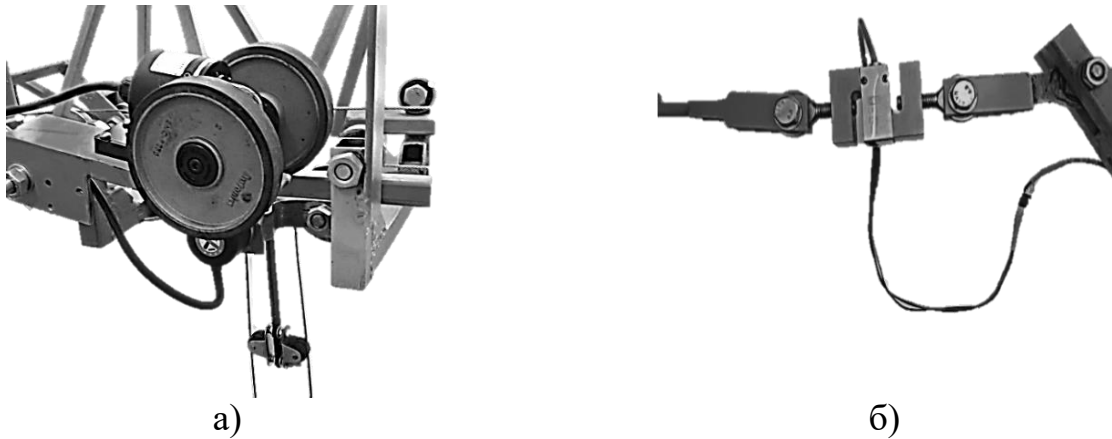


Рис. 14. Датчик ENC Autonics, який закріплено на вантажному візку (а), та тензومتر, який закріплено у відтяжці (б)

Для реалізації оптимальних законів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка розроблено систему керування, схему підключення елементів якої зображено на рис. 15, а. Також розроблено програму керування «ВВК» для 32 бітного мікроконтролера Cortex M2F (рис. 15, б) та підпрограми для 16 бітних контролерів MSP430.

Сплановано експериментальні дослідження, що відповідають дослідженням динамічного аналізу, який проведено в другому розділі. Оцінка відхилень теоретичних та експериментальних даних здійснювалась за дисперсією, середньоквадратичним відхиленням та коефіцієнтом варіації.

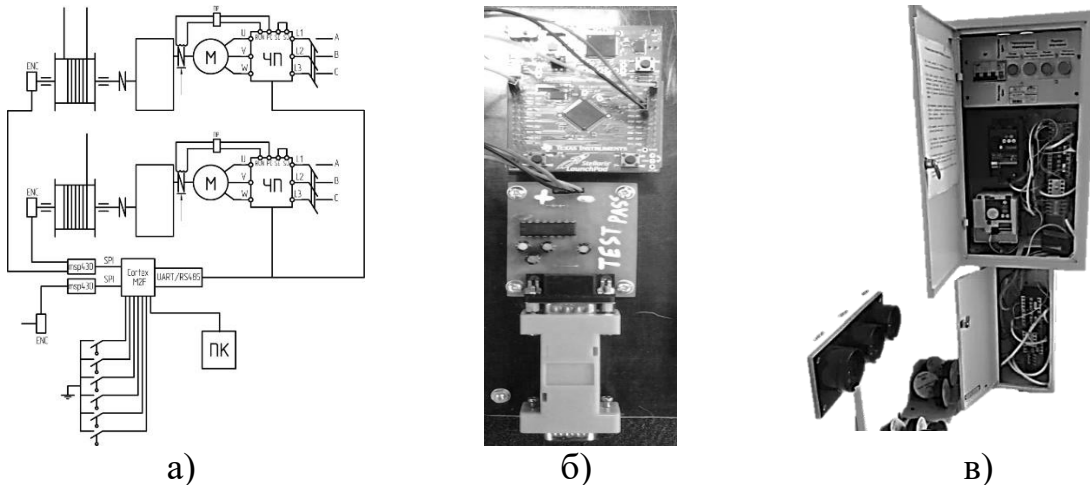


Рис. 15. Схема підключення компонентів системи керування (а), мікроконтролера з перетворювачем інтерфейсу (б) та зовнішній вигляд електрощита з частотними перетворювачами (в)

У п'ятому розділі «Результати експериментальних досліджень» приведено результати експериментальних досліджень за природних та оптимальних режимів руху та порівняно їх з теоретичними залежностями (рис. 16). Суцільною лінією зображено теоретичні дані, а крапками – експериментальні.

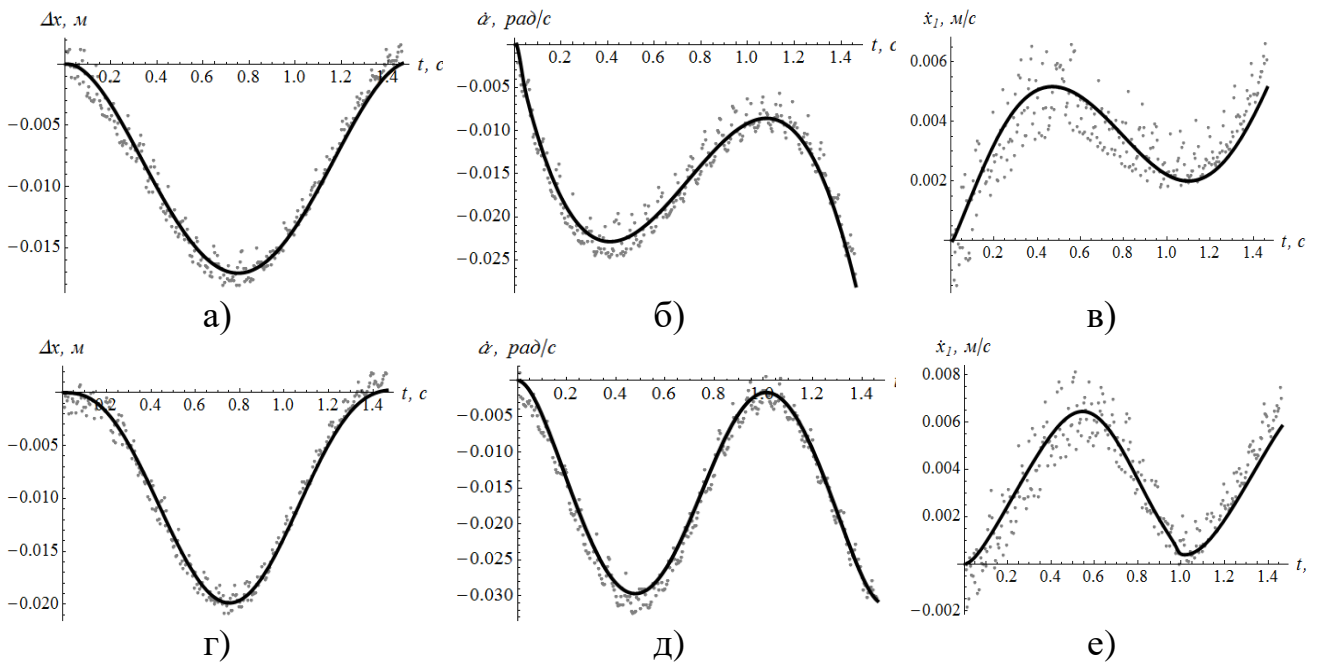


Рис. 16. Графіки зміни кінематичних характеристик для експерименту № 8: а) лінійне відхилення координати вантажу від координати його точки підвісу за критерієм (3) та г) критерієм (4); б) швидкість переміщення стрілової системи за критерієм (3) та д) критерієм (4); в) швидкість переміщення вантажного візка за критерієм (3) та е) критерієм (4).

Проведено серію експериментальних досліджень зміни вильоту за рахунок переміщення основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи та за рахунок сумісного руху основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка. Результати експериментальних досліджень отриманих за природним та оптимальними режимами руху порівнювались з відповідними теоретичними залежностями. Для кожного дослідження приводилася таблиця зі статистичними характеристиками. Так, наприклад, значення коефіцієнтів варіації знаходиться в межах 5,6–16,6 %, що свідчить про адекватність прийнятої математичної моделі зміни вильоту.

У шостому розділі **«Рекомендації щодо вдосконалення роботи баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою»** розроблено систему керування механізмами переміщення стрілової системи та вантажного візка баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою, яка реалізовує оптимальні режими руху.

Розроблено алгоритм роботи і програму системи керування, які забезпечують керування як окремо механізмом переміщення стрілової системи, так і сумісною роботою механізмів переміщення стрілової системи та вантажного візка. Даний алгоритм не враховує роботу механізмів підйому вантажу та повороту стрілової системи. Якщо ж стрілова система обертається чи працює механізм підйому вантажу, то такий алгоритм може бути включений у загальний алгоритм керування баштовим краном.

Приведено рекомендації щодо керування механізмами підйому стрілової системи та підйому вантажу, а також розроблено механізм, який дозволяє

виконувати обертальне позиціонування вантажу та усунути його обертальні коливання.

Результати роботи розробленої системи керування механізмами зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи крана апробовано на фізичній моделі крана «Liebher 140hc-k» в лабораторії динаміки машин НУБіП України і передано в господарства ТОВ «Червона волока», ТОВ «Нива» та ПП «Велідницьке».

Розраховано економічний ефект від впровадження системи оптимального керування баштовим краном з шарнірно-зчленованою стріловою системою. Розрахунок економічного ефекту включав скорочення робочого циклу та зменшення втрат енергії в приводних двигунах механізмів підйому стрілової системи та становить відповідно 50514 та 54146 грн/рік.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу оптимізації режиму зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою. Знайдено оптимальні закони керування приводними механізмами переміщення стрілової системи та вантажного візка, які підвищують експлуатаційні показники роботи крана.

1. Проаналізовано різні конструкції стрілових систем баштових кранів. Встановлено, що баштові крани з шарнірно-зчленованою стріловою системою включають переваги балочних стрілових систем, оскільки забезпечують горизонтальне переміщення вантажу при зміні вильоту, а також переваги підйомних стрілових систем, оскільки є важко маневреними. Разом з тим, конструкція шарнірно-зчленованої стрілової системи є досить складною, що затрудняє процес монтування на будівельному майданчику та вимагає особливої уваги до керування приводами зміни вильоту під час роботи крана.

2. Зберігається тенденція до розробки нових та удосконалення існуючих систем керування механізмами баштових кранів. Успішно використовуються системи керування з відкритим і закритим циклом. Використання fuzzy-логіки, адаптивних до умов роботи систем керування, стійких до зовнішніх збурень робастних систем та інших методів та засобів керування показало, що на сьогоднішній день не існує єдиного рішення щодо керування механізмами баштових кранів.

3. Розроблено математичну модель та проведено трифакторний динамічний аналіз зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою. Встановлено, що під час пуску виникають значні динамічні навантаження в елементах приводних механізмів, які в 2–5 разів більші від номінальних значень. Крім того, під час пуску виникають коливання вантажу, які тривають протягом усталеного руху та після зупинки. Після зупинки амплітуда залишкових коливань вантажу в 2–3 рази перевищує амплітуду коливань вантажу під час усталеного руху.

4. В результаті розв'язку оптимізаційних задач знайдено режими руху основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка, які усувають коливання вантажу після розгону та після зупинки, що дозволяє

скоротити робочий цикл переміщення вантажу в 1,3–2,7 рази. Також оптимальні режими руху дозволяють зменшити втрати в привідних електродвигунах під час перехідних режимів руху на 15–35 %.

5. Досліджено вплив параметрів кранового візка з гнучким підвісом вантажу на оптимальний динамічний режим руху. Показано, що при певних співвідношеннях довжини підвісу вантажу, часу розгону, мас візка та вантажу, при оптимальному динамічному режимі розгону візок здійснює реверсний рух. Так, наприклад, для довжини підвісу 15 м, часу розгону 3 с та усталеній швидкості 0,5 м/с виникає реверсний рух вантажу при співвідношеннях маси вантажу до маси візка 0,5; 1; 2. Крім того, виникають ділянки значень параметрів, на яких оптимізація за динамічним критерієм не дає бажаного результату.

6. Усі визначені оптимальні режими руху значно покращують кінематичні та динамічні характеристики руху. Так, наприклад, середньоквадратичне значення рушійного моменту механізму підйому стрілової системи зменшується в 1,44–1,84 рази, а механізму переміщення вантажного візка в 1,32–1,41 рази. В залежності від режиму руху максимальне значення рушійного моменту механізму підйому стрілової системи зменшується в 2,08–2,6 рази, а механізму переміщення вантажного візка в 1,34–2,13 рази. Максимальне відхилення вантажу при переміщенні стрілової системи зменшилося в 1,52–2,3 рази, а при переміщенні вантажного візка в 1,53 рази. Максимальне відхилення вантажу при сумісному переміщенні вантажного візка та вантажу зменшилося в 2,04–2,55 рази. Порівняння оптимальних режимів руху, отриманих за кінематичними, динамічними та енергетичними критеріями показали, що відхилення результатів не перевищує 3,5 %.

7. Проведено математичне моделювання оптимальних режимів руху за скалярним керуванням привідних електродвигунів та встановлено, що при зменшенні тривалості перехідних режимів руху збільшується похибка виконання оптимального режиму руху. Також визначено мінімальний час перехідного режиму руху, при якому стрілова система не змінює напрямку руху для усунення коливань вантажу. Так, наприклад, для критерію (3) час розгону становить 3,58 с, а для критерію (4) – 4,16 с при опусканні стрілової системи з крайнього верхнього положення в крайнє нижнє та довжині підвісу вантажу 20 метрів.

8. Опираючись на теорію подібності технічних систем розраховано параметри та виготовлено фізичну модель баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою, за допомогою якої встановлено адекватність побудованої математичної моделі зміни вильоту. Розроблено систему керування приводними електродвигунами механізмів підйому стрілової системи та переміщення вантажного візка, яка здійснює керування на природних та оптимальних механічних характеристиках. Вибрано вимірювально-реєструюче обладнання для проведення експериментальних досліджень. Результати експериментальних досліджень незначно відрізняються від теоретичних (коефіцієнт варіації знаходиться в межах 5,6–27,5 %).

9. Розроблено систему керування приводними механізмами зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою, яка реалізовує оптимальне керування і дозволяє зменшити максимальні значення приводних моментів та амплітуду коливань вантажу в 2–2,3 раза. Надані рекомендації щодо зрівноваження шарнірно-зчленованої стрілової системи при зміні вильоту.

10. Розраховано економічний ефект від впровадження системи оптимального керування баштовим краном з шарнірно-зчленованою стріловою системою. Розрахунок економічного ефекту включав скорочення робочого циклу крана та зменшення втрат електроенергії в обмотках приводного електродвигуна механізму переміщення стрілової системи і становить відповідно 50514 та 54146 грн/рік.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Ловейкін В. С. Оптимізація режиму вильоту вантажу баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Техніка будівництва. – 2008. – № 21. – С. 41–44. *(Здобувач провів оптимізацію режиму вильоту вантажу баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою).*

2. Ловейкін В. С. Оптимізація динамічного режиму пуску шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Техніка будівництва. – 2009. – № 23. – С. 24–29. *(Здобувач провів оптимізацію режиму пуску шарнірно-зчленованої стрілової системи за динамічним критерієм).*

3. Ловейкін В. С. Спосіб зрівноваження шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2011. – № 78. – С. 35–39. *(Здобувач розробив спосіб зрівноваження шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана).*

4. Ловейкін В. С. Оптимізація усталеного режиму руху кранового візка з гнучким підвісом вантажу за кінематичними критеріями / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2012. – № 80. – С. 14–17. *(Здобувач провів оптимізацію усталеного режиму руху кранового візка з гнучким підвісом вантажу за кінематичними критеріями).*

5. Ловейкін В. С. Аналіз зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2013. – № 82. – С. 20–27. *(Здобувач проаналізував зміну вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи).*

6. Ловейкін В. С. Побудова фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2014. – № 83. – С. 34–41.

(Здобувач обрахував параметри фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана).

7. Ловейкін В. С. Вплив параметрів кранового візка із гнучким підвісом вантажу на оптимальний динамічний режим руху / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університета. – 2014. – Вып. 156–160. – С. 143–149. *(Здобувач дослідив вплив параметрів кранового візка із гнучким підвісом вантажу на оптимальний динамічний режим руху).*

8. Ловейкін В. С. Експериментальне дослідження зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2015. – № 85. – С. 37–42. *(Здобувач проаналізував результати експериментів по зміні вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи).*

9. Ловейкін В. С. Аналіз систем керування механізмами баштових кранів для усунення коливань вантажу / В. С. Ловейкін, Є. Г. Афтандіянц, **О. Г. Шевчук** // Машинобудування. – 2015. – № 15. – С. 39–45. *(Здобувач провів аналіз систем керування механізмами баштових кранів які усувають коливання вантажу).*

**Статті у наукових фахових виданнях України,
включених до міжнародної наукометричної бази даних:**

10. Ловейкін В. С. Аналіз зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи при русі стріли: [електронний ресурс] / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2014. – № 1. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/2014_1/11.pdf *(Здобувач провів динамічний аналіз зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи).*

11. Ловейкін В. С. Стійкість динамічної системи візок-вантаж за оптимального динамічного режиму руху / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 196. – Ч. 1. – С. 190–196. *(Здобувач оптимізував режиму руху шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крану за динамічним критерієм).*

12. Ловейкін В. С. Експериментальне дослідження зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 196. – Ч. 1. – С. 176–185. *(Здобувач розробив методика експериментальних досліджень зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою, а також підібрав вимірально-реєструюче обладнання для проведення експериментів).*

13. Ловейкін В. С. Оптимізація режиму руху шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крану за динамічним критерієм / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і

природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 196. – Ч. 2. – С. 41–51. *(Здобувач оптимізував режиму руху шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана за динамічним критерієм).*

14. Афтанділянц Є. Г. Аналіз конструкцій стрілових систем баштових кранів / Є. Г. Афтанділянц, В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212. – Ч. 1. – С. 121–130. *(Здобувач провів аналіз конструкцій стрілових систем баштових кранів).*

Стаття у науковому виданні іншої держави

15. Ловейкін Вячеслав. Оптимизация режима изменения вылета башенного крана с шарнирно-сочлененной стреловой системой по энергетическому критерию / Вячеслав Ловейкин, **Александр Шевчук** // Motrol: Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2014. – Vol. 16. – № 3. – Р. 33–40. *(Здобувач провів оптимізацію режиму зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою за енергетичним критерієм).*

Патенти на корисну модель:

16. Патент на корисну модель 50033 Україна, МПК В66С 19/00 (2009). Механізм врівноваження стрілової системи у крані з горизонтальним переміщенням вантажу / В. С. Ловейкін, Д. А. Паламарчук, І. А. Паламарчук, **О. Г. Шевчук**; заявник та власник Київський національний університет будівництва і архітектури. – № u200911444; заявл. 10.11.2009; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10. *(Здобувач удосконалив механізм врівноваження стрілової системи у крані з горизонтальним переміщенням вантажу).*

17. Патент на корисну модель 88274 Україна, МПК В66С 1/10 (2006.01). Гакова підвіска вантажопіднімальних кранів / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук**; заявник та власник Національний університет біоресурсів та природокористування України. – № u201311115; заявл. 18.09.2013; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5. *(Здобувач удосконалив гакову підвіска вантажопіднімальних кранів).*

18. Патент на корисну модель 100059 Україна, МПК В66С 23/64 (2006.01). Пристрій керування приводом переміщення шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук**; заявник та власник Національний університет біоресурсів та природокористування України. – № u201413532; заявл. 16.12.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13. *(Здобувач удосконалив пристрій керування приводом переміщення шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана).*

Науковий твір:

19. Свідоцтво про реєстрацію авторських прав на твір № 61621 Комп'ютерна програма «Програма керування частотним перетворювачем механізму підйому стрілової системи баштового крана» / В. С. Ловейкін,

О. Г. Шевчук. *(Здобувач склав алгоритм роботи програми та написав програмний код програми керування частотним перетворювачем механізму підйому стрілової системи баштового крана).*

Матеріали і тези наукових доповідей:

20. Шевчук О. Г. Кінематика руху шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана при зміні вильоту вантажу / О. Г. Шевчук // Матеріали наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів Київського національного університету будівництва і архітектури. – К., 2009. – С. 129–130. *(Здобувач провів кінематичний аналіз руху шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана при зміні вильоту вантажу).*

21. Шевчук О. Г. Спосіб врівноваження шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана / **О. Г. Шевчук**, К. І. Почка // Матеріали 71-ї науково-практичної конференції КНУБА, м. Київ, 16–19 березня 2010 р.: тези доповіді / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2010. – С. 208–209. *(Здобувач розробив спосіб врівноваження шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана).*

22. Ловейкін В. С. Аналіз зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крану / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Матеріали 74-ї науково-практичної конференції КНУБА, м. Київ 9–12 квітня 2013 р.: тези доповіді. – Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2013. – С. 20–21. *(Здобувач провів аналіз зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крану).*

23. Шевчук О. Г. Механізм зрівноваження шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана / О. Г. Шевчук // Наукова конференція молодих вчених аспірантів і студентів: тези доповіді. – у 2-х частинах. – Ч. 1. – К.: КНУБА, 2012. – С. 184. *(Здобувач описав принцип роботи механізму зрівноваження шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана).*

24. Ловейкін В. С. Устойчивость динамической системы тележка-груз при оптимальном динамическом режиме движения / В. С. Ловейкін, **А. Г. Шевчук** // Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве: Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 03–05 июня 2014. – С. 72–77. *(Здобувач дослідив стійкість динамічної системи вантажний візок-вантаж за оптимальним динамічним режимом руху).*

25. Шевчук О. Г. Експериментальне дослідження зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою / О. Г. Шевчук // Інноваційний розвиток аграрної сфери: III Міжнародна наукова конференція, 19–21 березня 2015 р.: тези доповіді. – К., 2015. – С. 80–83. *(Здобувач провів експериментальне дослідження зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою).*

26. Ловейкін В. С. Оптимізація режиму зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою за енергетичним критерієм / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Матеріали 75-ї науково-практичної

конференції КНУБА, м. Київ, 15–18 березня 2014 р.: тези доповіді. – Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – С. 15–17. *(Здобувач провів оптимізацію режиму зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою за енергетичним критерієм)*

27. Шевчук О. Г. Аналіз зміни вильоту вантажу баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою / О. Г. Шевчук // Сучасні проблеми землеробської механіки: XVI Міжнародна наукова конференція, 17–19 жовтня 2015 р.: тези доповіді. – К., 2015. – С. 104–105. *(Здобувач провів аналіз зміни вильоту вантажу баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою).*

28. Ловейкін В. С. Створення фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крану / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природо-користування: Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, 11–15 березня 2014 р.: тези доповіді. – К., 2014. – С. 55. *(Здобувач визначив основні параметри фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи).*

29. Ловейкін В. С. Аналіз систем керування механізмами баштових кранів для усунення коливань вантажу / В. С. Ловейкін, **О. Г. Шевчук** // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, м. Тернопіль 19–21 травня 2015 р.: тези доповіді. – Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. – Тернопіль, 2015. – С. 110–111. *(Здобувач провів аналіз систем керування механізмами баштових кранів для усунення коливань вантажу).*

30. Шевчук О. Г. Аналіз регуляторів в оптимальній системі керування механізмом підйому шарнірно-зчленованої стрілової системи зі зворотним зв'язком / О. Г. Шевчук // Буд-Майстер-Клас-2015: I Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, до 85-ї річниці заснування КНУБА, м. Київ, 26–27 листопада 2015 р.: тези доповіді. – Київський національний університет будівництва і архітектури. – К, 2015.

АНОТАЦІЯ

Шевчук О. Г. Оптимізація режиму зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.05 – піднімально-транспортні машини. – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2016.

У дисертації наведено дослідження, що мають за мету підвищення ефективності роботи баштових кранів з шарнірно-зчленованою стріловою системою за рахунок оптимізації режиму зміни вильоту.

Проведено динамічний аналіз зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою за рахунок переміщення основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи а також за рахунок сумісного

переміщення основної секції шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка. Визначені основні кінематичні та динамічні характеристики при зміні вильоту.

Оптимізовано перехідні режими руху шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка за кінематичними, динамічними та енергетичними критеріями. Встановлено вплив параметрів шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка з підвішеним на гнучкому підвісі вантажем на оптимальні режими руху.

Отримано і представлено позитивний ефект при синтезі оптимальних режимів руху у вигляді зменшень динамічних навантажень у приводних механізмах та скорочення часу перевантажувальних операцій за рахунок усунення залишкових коливань вантажу у кінці періоду руху.

Розроблено систему керування приводами для реалізації оптимальних законів руху. Для підтвердження теоретичних розрахунків проведено експериментальні дослідження на розробленій фізичній моделі баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою.

На основі результатів досліджень запропоновано рекомендації з удосконалення конструкцій та керування рухом вантажопідйомних машин, захищених 3 патентами України на корисну модель та науковим твором.

Ключові слова: баштовий кран, зміна вильоту, перехідні режими руху, оптимізація, коливання вантажу.

АННОТАЦІЯ

Шевчук А. Г. Оптимизация режима изменения вылета башенного крана с шарнирно-сочлененной стреловой системой. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.05 – подъемно-транспортные машины. – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2016.

В диссертации приведены исследования, целью которых является повышение эффективности работы башенных кранов с шарнирно-сочлененной стреловой системой за счет оптимизации изменения вылета.

Проведен динамический анализ изменения вылета башенного крана с шарнирно-сочлененной стреловой системой за счет перемещения основной секции стреловой системы, а также за счет совместного перемещения основной секции стреловой системы и грузовой тележки. В качестве независимых факторов приняты положение основной секции шарнирно-сочлененной стреловой системы, направление ее движения и продолжительность движения. Определены основные кинематические и динамические характеристики механизмов подъема стреловой системы и перемещения грузовой тележки при изменении вылета. Движущие усилия смоделированы с использованием статических механических характеристик асинхронных электродвигателей. Выявлены значительные колебания груза и динамические нагрузки в механизмах изменения вылета, которые являются нежелательными и негативно влияют на эффективность работы башенного крана.

Оптимизированы переходные режимы движения шарнирно-сочлененной стреловой системы и грузовой тележки по кинематическим, динамическим и энергетическим критериям. Определено влияние параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы и грузовой тележки с подвешенным на гибком подвесе грузом на оптимальные режимы движения, а также проведен сравнительный анализ оптимальных режимов движения с природными по среднеквадратическому и максимальному значению движущего момента и по максимальному отклонению груза от точки подвеса.

Получен положительный эффект от применения оптимальных режимов движения в виде уменьшений динамических нагрузок в приводных механизмах и сокращения времени перегрузочных операций за счет устранения остаточных колебаний груза в конце периода движения.

Проведено моделирование оптимальных режимов движения по кинематическим критериям с использованием скалярного управления приводных асинхронных двигателей.

Для подтверждения теоретических расчетов проведены экспериментальные исследования на разработанной физической модели башенного крана с шарнирно-сочлененной стреловой системой. Параметры физической модели определены при использовании теории подобия технических систем. Также подобрано измерительно-регистрирующее оборудование, которое позволяет осуществлять сбор данных о движении шарнирно-сочлененной стреловой системы. Проведён расчет отклонений теоретических режимов движения от экспериментальных для природных и оптимальных режимов движения который позволяет установить адекватность математической модели механизма изменения вылета.

Разработана система управления приводными механизмами изменения вылета башенного крана с шарнирно-сочлененной стреловой системой, которая реализует оптимальное управление и позволяет уменьшить максимальные значения приводных моментов и амплитуду колебаний груза. Даны рекомендации по уравниванию шарнирно-сочлененной стреловой системы при изменении вылета.

Рассчитан экономический эффект от внедрения системы оптимального управления башенным краном с шарнирно-сочлененной стреловой системой. Расчет экономического эффекта включал сокращение рабочего цикла крана и уменьшения потерь электроэнергии в обмотках приводного электродвигателя механизма подъёма стреловой системы, что составляет соответственно 50514 и 54146 грн/год.

На основе результатов исследований предложены рекомендации по совершенствованию конструкций и управления движением грузоподъемных машин, защищенных 3 патентами Украины на полезную модель и научным производением.

Ключевые слова: башенный кран, изменение вылета, переходные режимы движения, оптимизация, колебания груза.

ANNOTATION

Shevchuk O. H. Optimization of luffing articulated jib tower crane. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.05 – lifting-conveyed machines. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis shows research aimed at improving the efficiency of the articulated jib tower cranes by optimizing of luffing.

The dynamic analysis of luffing tower crane with an articulated jib by moving the main section of the joint-articulated jib systems and by moving the main sections hinged articulated boom system and trolley. The basic kinematic and dynamic characteristics by changing departure.

Optimized transitional regimes motion hinge-jointed boom system and trolley for kinematic and energy criteria. The influence of parameters hinge-jointed boom system and trolley with flexible suspension hanging on the load on the best modes of motion.

Obtained and presented a positive effect in the synthesis of the optimal mode of motion in the form of reductions in dynamic loads in the drive mechanism and reducing the time of transfer operations by eliminating the residual load fluctuations at the end of the period of movement.

The system of control drives for optimal implementation of the laws of motion. To confirm the theoretical calculations performed experimental studies on the developed physical model of tower crane with a hinge-jointed boom system.

Based on the research results offered recommendations to improve traffic control and construction lifting equipment, protected by three patents of Ukraine for utility model and scientific work.

Key words: tower crane, luffing, articulated jib, transient motion, optimization, load oscillations.