Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020, Vol. 11, No 4, 5-12
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.04.005

УДК 621.873

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВІЗКА БАШТОВОГО КРАНА

В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, О. В. Стехно

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття зі спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: lovvs@ukr.net.

Історія статті: отримано – серпень 2020, акцептовано – жовтень 2020.
Бібл. 10, рис. 8, табл. 6.

Анотація. У статті наведено опис лабораторної моделі стрілової системи баштового крана, вимірювально-реєструюче обладання (датчики, система збору даних, блок живлення тощо), силове керуюче обладнання (частотний перетворювач), програмне забезпечення для збору даних та для керування частотним перетворювачем. Проведено планування експериментів із досліджень оптимального керування руху моделі. Всі експерименти поділено на дві серії: для оптимального за швидкодією керування та для оптимального за інтегральним критерієм керування. Для першої серії експериментів незалежними факторами обрано масу вантажу (варіювалась на трьох рівнях) та довжину гнучкого підвісу (варіювалась на двох рівнях). Для другої серії експериментів було враховано ще один незалежний фактор – тривалість розгону (гальмування) візка. Цей фактор варіювався на тьох рівнях.

Аналіз експериментальних досліджень було проведено за величинами коефіцієнта варіації (відхилення теоретичних та експериментальних даних) та із використанням графічних залежностей. Результати аналізу показали досить високу збіжність отриманих у ході експеримента даних та даних, які були отримані розрахунковим шляхом. Наявні відхилення викликані неточністю задання параметрів системи, неврахованістю всіх значимих факторів, які впливають на рух системи, а також не якісною реалізацією керування під час різких змін швикості руху візка.

Наведено рекомендації, які дозволять усунути вказані фактори та забезпечити подальше вдосконалення техніки реалізації оптимального керування на практиці.

Ключові слова: баштовий кран, механізм переміщення візка, оптимальне керування, експеримент, коливання вантажу, оцінка.

Постановка проблеми

Одним із факторів, які впливають на ефективність експлуатації баштових кранів є прийоми та методи керування рухом їх механізмів. У зв'язку з цим практична реалізація оптимального керування дозволяє використати наявні ресурси щодо покращення умов безпеки переміщення вантажів, підвищити продуктивність роботи крана та забезпечити енергоефективність роботи його приводних механізмів.

Практичній реалізації оптимального керування повинні передувати експериментальні дослідження руху механізмів. На сьогоднішній день в умовах швидкого зведення будівельних споруд різного типу та складності, проведення експериментальних досліджень на реальному баштовому крані є доволі складною задачею. Крім того, проведення експериментальних досліджень із використанням реального баштового крана ускладнене через вимоги техніки безпеки, складність монтажу вимірювально-реєструючого обладнання тощо. Тому доцільно проводити експериментальні дослідження із використанням лабораторних моделей. Це питання визначає предмет даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень

У роботі [1] розроблено контролер, який дає змогу керувати рухом механізмів повороту та зміни вильоту баштового крана. Тут наведено результати чисельного розрахунку керування та відповідні експерименти. Встановлено, що розроблений підхід дає змогу досить ефективно виконувати керування таким чином, щоб забезпечити мінімальне відхилення траєкторії руху вантажу від заданої траєкторії.

У статті [2] проведено розрахунок оптимальних за швидкодією керувань рухом для моделі баштового крана із чотирма ступеняти вільності. У дослідженнях враховано обмеження на рух окремих елементів системи. Експериментально доведено валідність розроблених підходів. Для цього експериментальні дослідження проведені при змінній масі вантажу, при різних положеннях візка на стрілі та при різній довжині гнучкого підвісу вантажу. Крім того, розроблені у науковій роботі підходи дозволяють усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі.

Для того, щоб виконувати ефективне керування такою нелінійною системою як баштовий кран, в якій можуть бути присутні невизначеності (наприклад, стосовно параметрів системи та зовнішніх впливів на неї), у статті [3] пропонується адаптивна схема керування механізмами баштового крана з метою позиціювання вантажу з усуненням його коливань. Описані у роботі експериментальні результати показують, що розроблений підхід є ефективним і забезпечує задовільну робастність керування.

Подібний підхід запропоновано у роботі [4] де кран також розглядається як нелінійний об'єкт керування. У цьому дослідженні для компенсації тертя та інших неврахованих факторів запропоновано використовувати інтегральний копонент у алгоритмі формування керуючого впливу. Експериментальні дослідження, які проведені у лабораторних умовах, підтвердили ефективність теоретичних розрахунків.

У роботі [5] досліджено оптимізацію переміщення візка на стрілі баштового крана та підйом вантажу. Тут також виконана експериментальна перевірка розрахованих оптимальних законів руху механізмів зміни вильоту вантажу та підйому вантажу. Вона показала, що програмне оптимальне керування дозволяє усунути маятникові коливання вантажу на гнучкому підвісі при мінімізації інтегрального оптимізаційного критерію.

Таким чином, проведення експериментальних досліджень є необхідною вимогою для практичної реалізації теоретичних досліджень, оскільки дозволяє встановити фактори, які мають негативний вплив на якість реалізації оптимального керування.

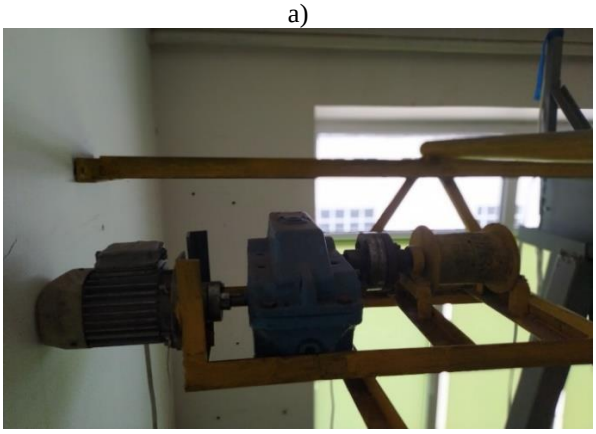
Мета досліджень

Мета дослідження полягає у отриманні рекомендацій щодо якісної реалізації оптимального керування рухом візка механізму зміни вильоту вантажу баштового крана. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: 1) обрати вимірювально-реєструюче обладнання та розробити програмне забезпечення для проведення експериментів; 2) провести планування експериментальних досліджень; 3) виконати аналіз отриманих даних та вказати рекомендації стосовно реалізації оптимального керування на практиці.

Результати досліджень

Експериментальні дослідження були проведені на існуючій конструкції фізичної моделі стрілової системи баштового крана, яка знаходиться у лабораторії динаміки машин кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України (рис. 1) [5]. Приводна лебідка встановлена на лабораторній моделі і складається із асинхронного електродвигуна із короткозамкненим ротором 4АА56В4У3, двоступеневого циліндричного редуктора та канатного барабану радіусом 6,5 см.

а)



б)

Рис. 1. Зовнішній вигляд лабораторної моделі: а) стріла; б) лебідка з приводом.

Fig. 1. Appearance of lab installation: a) boom; b) winch with drive.

Для проведення експериментальних досліджень виконано підбір та змонтовано необхідне обладнання, що дозволить здійснювати керування асинхронним електродвигуном при прямому та частотно-керованому пуску (рис. 2).

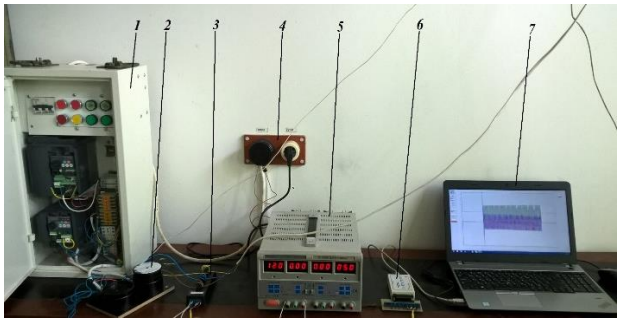


Рис. 2. Зовнішній вигляд обладнання для проведення експериментів.

Fig. 2. Appearance of equipment for lab researches.

На рис. 2 зображено наступні елементи: 1 – щиток з частотними перетворювачами (FR-E700-060-EC [6]); 2 – вилка живлення електродвигуна механізму зміни вильоту вантажу; 3 – датчик струму (MICRO SWITCH FREEPORT CSLA1SD 1314 MEX); 4 – мережа живлення електрообладнання (220 та 380 В); 5 – лабораторний блок живлення (HYELEC HUA YI ELECTRINICS DC POWER SUPPLY HY3003M-3); 6 – пристрій збору даних (m-DAQ 14); 7 – персональний

комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням (m-DAQ 14 Reader v 1.2).

Для визначення швидкості переміщення вантажного візка використовувався енкодер лінійного переміщення ENC Autonics [7], який встановлено на вантажному візку таким чином, щоб одне з його коліс торкалося полиці кутника, по який безпосередньо відбувається переміщення візка (рис. 3, а).

Кут відхилення від вертикалі закріпленого на гнучкому підвісі вантажу визначено за допомогою енкодера кутового переміщення MOL-40 Megatron [8] (рис. 3, б).

а)

б)

Рис. 3. Зовнішній вигляд енкодерів: а) для вимірювання переміщення візка; б) для вимірювання коливань закріпленого на гнучкому підвісі вантажу.

Fig. 3. Appearance of encoders: a) for trolley position; b) for load oscillations.

Реалізація оптимальних режимів пуску системи виконана за допомогою розробленого програмного забезпечення *«Optimal control of derricking mekhanism of tower crane»* (рис. 4).

Зв'язок між персональним комп'ютером та частотним перетворювачем відбувається за допомогою відповідного COM-порту [9]. Від персонального комп'ютера до частотного перетворювача із певною послідовністю відбувається надходження відповідних керуючих сигналів, котрі призводять до того, що змінюється частота і амплітуда напруги живлення електродвигуна, а це призводить до зміни величини його кутової швидкості.

Запропоновано дослідити вплив тривалості розгону до усталеної швидкості руху візка t_1, довжини гнучкого підвісу вантажу L і маси вантажу m_2 на якість відпрацьовування оптимального керування механізмом. Для задачі оптимальної швидкодії руху візка з вантажем [10] виконувалось варіювання лише двох факторів: довжини гнучкого підвісу L та маси закріпленого вантажу m_2 (табл. 1). Це зумовлено тим, що тривалість розгону t_1 визначається у ході розв'язання задачі оптимальної швидкодії.

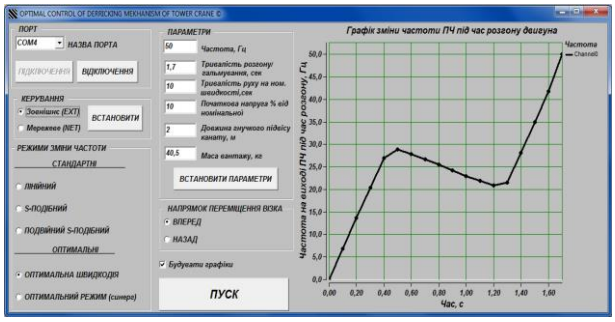


Рис. 4. Інтерфейс програми для керування рухом лабораторної установки.

Fig. 4. Interface of the developed software for control of lab installation movement.

Таблиця 1. План експериментів при реалізації оптимальної швидкодії руху установки.

Table 1. Plan of the experiments for optimal duration implementation of installation movement.

Довжина гнучкого підвісу вантажу, м	1,2			2		
Маса вантажу, кг	13	27	40,5	13	27	40,5
Номер експерименту	1	2	3	4	5	6

Для дослідження оптимального керування при мінімізації середньоквадратичної величини рушійного зусилля план повнофакторного експерименту представлено у табл. 2.

Таблиця 2. План експериментів при реалізації оптимального керування за інтегральним критерієм.

Table 2. Plan of the experiments for optimal integral criterion implementation.

Довжина гнучкого підвісу вантажу, м	1,2			2		
Тривалість розгону, с	1,7					
Маса вантажу, кг	13	27	40,5	13	27	40,5
Номер експерименту	1	2	3	4	5	6
Тривалість розгону, с	2,2					
Маса вантажу, кг	13	27	40,5	13	27	40,5
Номер експерименту	7	8	9	10	11	12
Тривалість розгону, с	2,7					
Маса вантажу, кг	13	27	40,5	13	27	40,5
Номер експерименту	13	14	15	16	17	18

Кожен експеримент проводився у трикратній повторюваності.

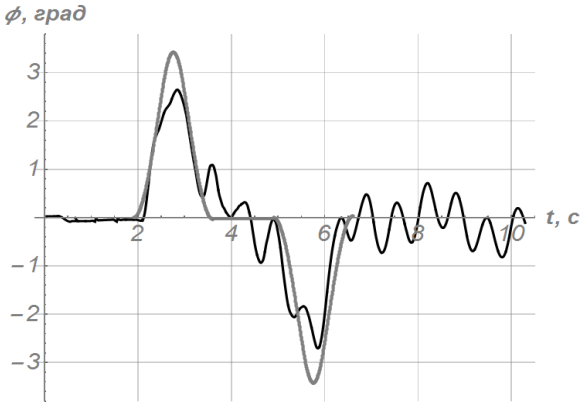
Проведемо аналіз амплітуд відхилення канату із закріпленим вантажем від вертикалі при різних режимах руху системи «візок-вантаж» механізму зміни вильоту вантажу.

Наведемо значення амплітуд відхилення канату із закріпленим вантажем від вертикалі при реалізації оптимальної швидкодії системи «візок-вантаж» механізму зміни вильоту вантажу (табл. 3).

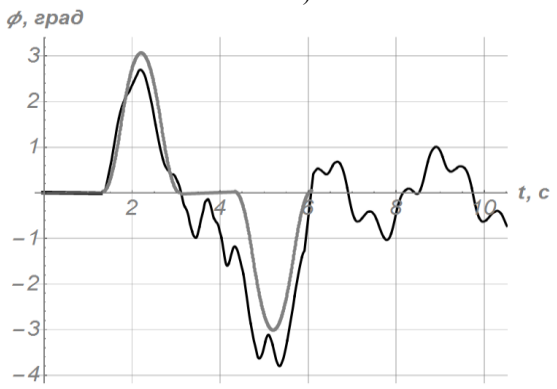
Таблиця 3. Амплітуди коливань вантажу при реалізації оптимальної швидкодії, град.

Table 3. Amplitudes of load oscillations during optimal duration control, deg.

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6
Етап руху:						
- пуск	2,7	3,4	2,8	2,8	3,0	2,2
- гальмування	2,6	4,0	3,0	3,8	3,4	2,7
- після зупинки візка	0,8	0,8	0,6	1,2	0,6	0,5



а)



б)

Рис. 5. Графічні залежності відхилення канату із вантажем від вертикалі при реалізації оптимальної швидкодії руху установки для експериментів: а) №1; б) №4.

Fig. 5. Plots of load deviation under implementation of optimal duration control of the installation for experiments: a) №1; b) №4.

Наведемо також графічні залежності відхилення канату із вантажем від вертикалі для експериментів №1 та №4 для теоретичних (сіра крива) та експериментальних (чорна крива) даних (рис. 5).

Спостерігаються не суттєві відхилення експериментальних значень у порівнянні із теоретичними, особливо під час перехідного процесу гальмування (рис. 5). Значення коефіцієнта варіації амплітуд відхилення канату з вантажем для серій всіх експериментальних досліджень знаходиться у діапазоні від 2,8 до 26,5 % – для розгону та 8,8…23,1 % – для режима гальмування.

Навеедмо аналогічні результати для експериментальних досліджень із реалізації оптимального за інтегральним критерієм керування (табл. 4).

Таблиця 4. Амплітуди коливань вантажу при реалізації оптимального за інтегральним критерієм керування, град.

Table 4. Amplitudes of load oscillations during optimal by integral criterion control, deg.

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6
Етап руху:						
- пуск	2,8	3,0	2,5	2,4	2,4	3,6
- гальмування	3,4	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
- після зупинки візка	0,5	0,6	0,5	0,8	0,7	1,1
Номер експерименту	7	8	9	10	11	12
Етап руху:						
- пуск	2,4	1,9	2,4	2,4	2,2	2,8
- гальмування	2,9	1,7	2,4	2,6	2,8	3,0
- після зупинки візка	0,6	0,6	0,4	0,8	0,8	0,8
Номер експерименту	13	14	15	16	17	18
Етап руху:						
- пуск	2,2	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0
- гальмування	2,4	2,1	2,6	2,4	2,0	2,4
- після зупинки візка	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5

Збільшення тривалості розгону системи «візок-вантаж» від 1,7 до 2,7 секунд не суттєво впливає на мінімізацію амплітуди відхилення канату із закріпленим вантажем, однак може призводити до зниження продуктивності роботи крана, що є небажаним.

Наведемо порівняльні графічні залежності відхилення канату від вертикалі для деяких експериментальних досліджень (рис. 6).

Для тривалості розгону 1,7 с, значення коефіцієнта варіації розбіжності теоретичних та експериментальних значень амплітуд коливань вантажу для режиму пуску знаходиться у діапазоні 3,2…17,2 %, а для режиму гальмування в діапазоні 3,2…28,1 %.

Аналогічні показники для тривалості розгону 2,2 с становлять: 0,5…20,8 % – для режиму розгону і 4,1…25,9 % – для режиму гальмування. У випадку, коли тривалість розгону становить 2,2 с отримано такі значення коефіцієнта варіації: 0…9,0 % – для режима розгону, 0…16,6 % – для режиму гальмування.

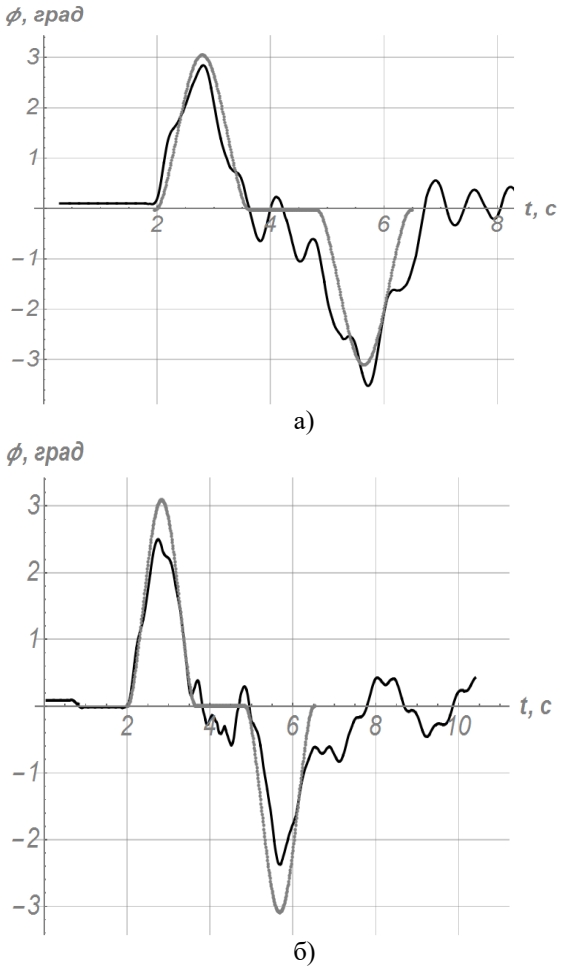


Рис. 6. Графічні залежності відхилення канату із вантажем від вертикалі при реалізації оптимального за інтегральним критерієм керування для експериментів: а) №1; б) №3.

Fig. 6. Plots of load deviation under implementation of optimal integral ceriterion control for experiments: a) №1; b) №3.

На величину отрманих розбіжностей можуть впливати наступні фактори: неточність задання значень деяких параметрів системи (маси вантажу, довжини гнучкого підвісу тощо), неякісна реалізація оптимального режиму розгону та гальмування, невраховані у моделі фактори (тертя, нерівність шляху, по якому рухається візок, коливання вантажу як подвійного маятника (рис. 5, 6) тощо).

Проведемо аналіз експериментальних даних швидкості переміщення вантажного візка. Для оптимального за швидкодією керування наведемо графічні залежності (рис. 7).

Із аналізу представлених графічних залежностей (рис. 7), спостерігається доволі якісна практична реалізація оптимального за швидкодією керування.

Значення коефіцієнтів варіації розбіжності теоретичних та експериментальних даних для цих дослідів наведені у табл. 5.

Для реалізованих оптимальних за інтегальним критерієм керувань графічні залежності швидкості переміщення візка представлені на рис. 8.

Для цих досліджень було розраховано величини коефіцієнтів варіації, які вказують відхилення теоретичних та експериментальних даних (табл. 6).

Розраховані показники коефіцієнтів варіації не перевищують 29,5%, а це говорить про доволі якісну реалізацію оптимальних режимів руху системи «візок-вантаж» механізму зміни вильоту вантажу. На відхилення теоретичних та експериментальних даних впиває низка факторів, які бути вказані раніше.

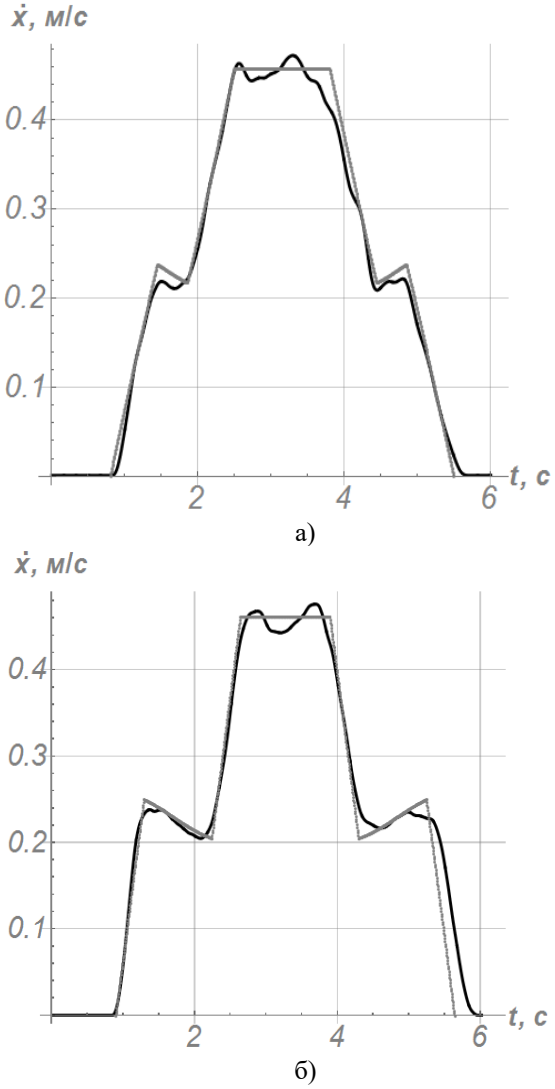


Рис. 7. Графічні залежності швидкості руху візка при реалізації оптимального за швидкодією керування для експериментів: а) №1; б) №4.

Fig. 7. Plots of trolley velocity under implementation of optimal duration control for experiments: a) №1; b) №4.

Таблиця 5. Коефіцієнти варіації теоретичних та експериментальних даних при оптимальному за швидкодією керування, %.

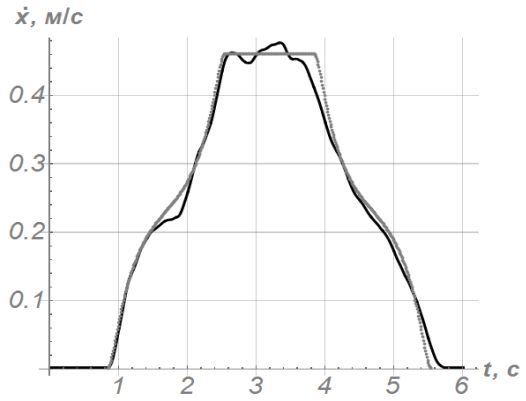
Table 5. Coefficients of variation of theoretical and experimental data under optimal duration control, %.

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6
Етап руху:						
- пуск	8,3	4,3	11,9	2,1	1,1	1,2
- гальмування	13,1	16,1	16,6	10,6	8,3	11,8

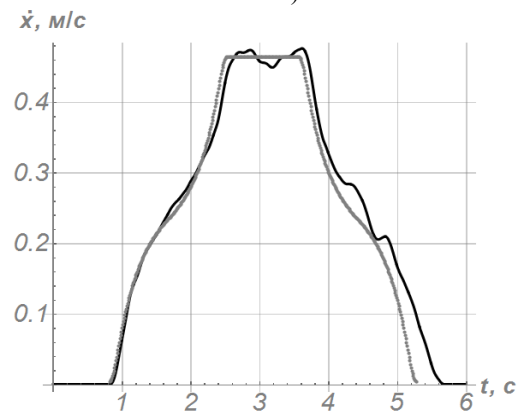
Таблиця 6. Коефіцієнти варіації теоретичних та експериментальних даних при оптимальному за інтеграним критерієм керування, %.

Table 6. Coefficients of variation of theoretical and experimental data under optimal by integral criterion control, %.

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6
Етап руху:						
- пуск	15,3	4,2	3,8	4,5	20,5	20,5
- гальмування	4,3	12,5	13,7	26,6	28,5	20,8
Номер експерименту	7	8	9	10	11	12
Етап руху:						
- пуск	8,5	22,2	21,4	11,5	8,3	3,3
- гальмування	12,5	29,5	25,9	28,5	17,6	20,5
Номер експерименту	13	14	15	16	17	18
Етап руху:						
- пуск	9,5	15,3	7,6	6,6	8,3	2,8
- гальмування	10,5	11,1	9,3	10,7	8,5	14,2



а)



б)

Рис. 8. Графічні залежності швидкості руху візка при реалізації оптимального за інтегральним критерієм керування для експериментів: а) №1; б) №3.

Fig. 8. Plots of trolley velocity under implementation of optimal by integral criterion control for experiments: a) №1; b) №3.

Одним із заходів, які дозволяють підвищити якість реалізації оптимальних законів руху системи є введення зворотного зв'язку за швидкістю руху візка. Крім того, якість реалізації оптимального керування можна підвищити шляхом більш точного задання параметрів системи. Для цього необхідно використовувати датчики відповідних величин (маси вантажу, довжини гнучкого підвісу тощо).

Висновки

1. У дослідженні проведено опис лабораторної моделі механізму зміни вильоту вантажу баштового крана та підібрано вимірювально-реєструюче обладнання. Проведено планування експериментальних досліджень для оптимального за швидкодією та для оптимального за інтегральним критерієм керуваннь.

2. Аналіз відхилень теоретичних та експериментальних даних коливань вантажу на гнучкому підвісі, а також швидкостей руху візка при реаліазції оптиманих керувань показав доволі якісну картину реалізації цих керувань на практиці.

3. Разом з тим, існуючі відхилення характеристик можна зменшити шляхом введення зворотного зв'язку (наприклад, за швидкістю руху приводу механізму зміни вильоту вантажу), більш точнішого задання параметрів системи (маси вантажу, довжини гнучкого підвісу вантажу) та використання більш складних математичних моделей (наприклад, вантаж у постановочній частині задач необхідно представляти як подвійний математичний маятник).

Список літератури

1. *Bock M., Kugi A.* Real-time Nonlinear Model Predictive Path-Following Control of a Laboratory Tower Crane. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014. Vol. 22. Issue 4. P. 1461-1473. doi: 10.1109/tcst.2013.2280464.

2. *Liu Z., Yang T., Sun N., Fang Y.* An Antiswing Trajectory Planning Method with State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments. IEEE Access. 2019. 1-1. doi: 10.1109/access.2019.2915999.

3. *Sun N., Fang Y., Chen H., Lu B., Fu Y.* Slew/Translation Positioning and Swing Suppression for 4-DOF Tower Cranes With Parametric Uncertainties: Design and Hardware Experimentation. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. Issue 10. P. 6407-6418. doi: 10.1109/tie.2016.2587249.

4. *Sun N., Wu Y., Chen H., Fang Y.* Antiswing Cargo Transportation of Underactuated Tower Crane Systems by a Nonlinear Controller Embedded With an Integral Term. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2019. P. 1–12. doi: 10.1109/tase.2018. 2889 434.

5. *Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Шумілов Г. В.* Оптимізація режиму зміни вильоту і підйому вантажу баштового крана. Монографія. Київ. НУБІП України. Вид-во ЦП „КОМПРІНТ". 2013. 174 с.

6. FR-E700. Преобразователь частоты. Руководство по эксплуатации / URL: https://chastotnik.com.ua/media/manuals/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8%20%D1%87%D0%B0%D1%81%

D1%82%D0%BE%D1%82%D1%8B/Mitsubishi_Electric/FR-E/FR-E_manual_rus.pdf (дата звернення 01.10.2020).

7. ENC Series. Wheel type of Incremental Encoder URL: https://www.autonicsonline.com/image/pdf/ENC.pdf (дата звернення 01.10.2020).

8. Data Sheet for Angle Sensors. Optical Encoders Series MOL40 URL: https://www.megatron.de/ fileadmin/user_upload/Datenblaetter/Winkelsensoren/Optische_Drehgeber/DS_MOL40_en.pdf (дата звернення 01.10.2020).

9. *Ying Bai*. The windows serial port programming handbook. CRC Press LLC. 2005. 824 p.

10. *Romacevych Y., Loveikin V., Stekhno O.* Closed-loop optimal control of a system Trolley - Payload. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2019. Vol. 81. Issue 2. P. 3-12.

References

1. *Bock M., Kugi A.* (2014). Real-time Nonlinear Model Predictive Path-Following Control of a Laboratory Tower Crane. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 22(4). 1461-1473. doi: 10.1109/tcst.2013.2280464.

2. *Liu Z., Yang T., Sun N., Fang Y.* (2019). An Antiswing Trajectory Planning Method with State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments. IEEE Access. 1-1. doi: 10.1109/access.2019.2915999.

3. *Sun N., Fang Y., Chen H., Lu B., Fu Y.* (2016). Slew/Translation Positioning and Swing Suppression for 4-DOF Tower Cranes With Parametric Uncertainties: Design and Hardware Experimentation. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 63(10). 6407-6418. doi: 10.1109/tie.2016.2587249.

4. *Sun N., Wu Y., Chen H., Fang Y.* (2019). Antiswing Cargo Transportation of Underactuated Tower Crane Systems by a Nonlinear Controller Embedded With an Integral Term. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 1-12. doi: 10.1109/tase.2018.2889434.

5. *Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Shumilov H. V.* (2013). Tower crane regimes of lifting and derricking optimization. Kyiv. NULES of Ukraine. Publisher TsP «KOMPRINT». 174.

6. FR-E700. Frequency inverter. Manual / URL: https://chastotnik.com.ua/media/manuals/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D1%8B/Mitsubishi_Electric/FR-E/FR-E_manual_rus.pdf (дата звернення 01.10.2020).

7. ENC Series. Wheel type of Incremental Encoder URL: https://www.autonicsonline.com/image/pdf/ ENC.pdf (дата звернення 01.10.2020).

8. Data Sheet for Angle Sensors. Optical Encoders Series MOL40 URL: https://www.megatron.de/fileadmin/user_upload/Datenblaetter/Winkelsensoren/Optische_Drehgeber/DS_MOL40_en.pdf (дата звернення 01.10.2020).

9. *Ying Bai*. (2005). The windows serial port programming handbook. CRC Press LLC. 824.

10. *Romacevych Y., Loveikin V., Stekhno O.* (2019). Closed-loop optimal control of a system Trolley - Payload. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 81(2). 3-12.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТЕЛЕЖКИ БАШЕННОГО КРАНА

В. С. Ловейкин, Ю. А. Ромасевич, А. В. Стехно

Аннотация. В статье приведено описание лабораторной модели стреловой системы башенного крана, измерительно-регистрирующее оборудование (датчики, система сбора данных, блок питания и т.п.), силовое управляющее оборудование (частотный преобразователь), программное обеспечение для сбора данных и для управления частотным преобразователем. Проведено планирование экспериментов по исследованию оптимального управления движением модели. Все эксперименты разделены на две серии: для оптимального по быстродействию управления и для оптимального по интегральному критерию управления. Для первой серии экспериментов независимыми факторами выступали масса груза (варьировалась на трех уровнях) и длина гибкого подвеса (варьировалась на двух уровнях). Для второй серии экспериментов учтен еще один независимый фактор – длительность разгона (торможения) тележки. Этот фактор варьировался на трех уровнях.

Анализ экспериментальных исследований было проведено по значеним коэфициента вариации (отклонения теоретических и экспериментальных данных) и с использованием графических зависимостей. Результаты анализа показали достаточно высокую сходимость полученных в ходе эксперимента данных и данных, которые были получены расчетным путем. Имеющиеся отклонения вызваны неточностью задания параметров системы, неучтенностью всех значимых факторов, влияющих на движение системы, а также некачественной реализацией управления при резких изменениях скорости движения тележки.

Приведены рекомендации, которые позволят устранить указанные факторы и обеспечить дальнейшее совершенствование техники рализации оптимального управления на практике.

Ключевые слова: башенный кран, механизм перемещения тележки, оптимальное управление, эксперимент, колебания груза, оценка.

ANALISYS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF OPTIMAL CONTROL OF TOWER CRANE TROLLEY MOVEMENT MECHANISM

V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevych, O. V. Stekhno

Abstract. The article describes the laboratory model of the tower crane boom system, measuring and recording equipment (sensors, data collection system, power supply, etc.), power control equipment (frequency inverter), and software for data collection and for the frequency inverter control. Planning of experiments for investigation of

optimal control of lab model movement was carried out. All experiments are divided into two series: for time optimal control and for control optimal by the integral criterion. For the first series of experiments, the weight of the load (has been varied at three levels) and the length of the flexible suspension (has been varied at two levels) acted as independent factors. For the second series of experiments, one more independent factor was taken into account – the duration of the trolley acceleration (deceleration). This factor has been varied at three levels.

The analysis of experimental studies was carried out in terms of variation indicators (deviation of theoretical and experimental data) and graphical dependencies. The results of the analysis showed a sufficiently high convergence of the data obtained during the experiments with those that were obtained by calculation. The existing deviations are caused by the inaccuracy of setting the parameters of the system, the failure to take into account all the significant factors affecting the movement of the system, as well as poor-quality implementation of control with rapid changes in the speed of the trolley movement.

Recommendations are given that will eliminate the described factors and ensure further improvement of the technique for implementing optimal control in practice.

Key words: tower crane, trolley movement mechanism, optimal control, experiment, load oscillations, evaluation.

В. С. Ловейкін ORCID 0000-0003-4259-3900.
Ю. О. Ромасевич ORCID 0000-0001-5069-5929.
О. В. Стехно ORCID 0000-0002-7285-6508.