

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

КРУШЕЛЬНИЦЬКИЙ ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.87

**ОБГРУНТУВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ПЕРЕМІЩЕННЯ
ВАНТАЖОПДІЙОМНИХ КРАНІВ МОСТОВОГО ТИПУ**

05.05.05 «Піднімально-транспортні машини»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в 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
Паламарчук Дмитро Анатолійович,
Київський національний університет
будівництва і архітектури,
доцент кафедри основ професійного навчання

Захист відбудеться «03» жовтня 2017 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. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

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

Автореферат розіслано «02» вересня 2017 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. Л. Роговський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кран мостового типу є електромеханічною системою, яка працює у циклічному режимі. Переміщення вантажу умовно розділяється на режим пуску, переміщення крана на усталеній швидкості та гальмування. Значна частина робочого часу витрачається на перехідні процеси руху, також слід відмітити, що пікові динамічні навантаження виникають в приводному механізмі та у металоконструкції крана саме під час перехідних режимів. Також переміщення крана супроводжується коливаннями вантажу, що призводить до додаткових навантажень на елементи конструкції крана, як під час пуску та гальмування, так і при переміщенні крана на усталеній швидкості. Зусилля, що діють у металоконструкціях, призводять до їх передчасного руйнування, виходу з ладу електродвигунів, зношування кранових механізмів та ускладнення керуваності краном в цілому. Під час виникнення цих негативних факторів збільшуються витрати електроенергії і зменшується надійність роботи кранових механізмів. В разі поломки крана відбуваються простої виробництва, що призводить до додаткових витрат. Тому дослідження заходів, що спрямовані на обґрунтування перехідних режимів переміщення кранів мостового типу є актуальним завданням, яке дасть змогу підвищити їхню ефективність і збільшити строк експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно з науково-дослідною тематикою кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України при виконанні теми «Оптимізація режимів руху механізмів ПТМ, що використовуються при механізації виробничих процесів у тваринництві і рослинництві» (номер державної реєстрації 0105U007502) та держбюджетних тем «Розробка концепції динамічної оптимізації транспортуючих машин» (номер державної реєстрації 0115U003351) і «Обґрунтувати інтегровані технологічні процеси та технічні засоби для органічного виробництва сільськогосподарської продукції в агроєкосистемах» (номер державної реєстрації 0112U001678).

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження – підвищити ефективність вантажопідйомних кранів мостового типу за рахунок зменшення динамічних навантажень в елементах металоконструкцій та приводних механізмів шляхом обґрунтування перехідних режимів переміщення та розроблення системи оптимального керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз останніх досліджень у напрямі зменшення динамічних навантажень в металоконструкціях та приводних механізмах мостових кранів;
- проаналізувати динаміку руху кранів мостового типу та провести оптимізацію перехідних режимів механізму переміщення крана;
- розробити методику та провести експериментальні дослідження динаміки руху мостового крана при різних режимах керування;
- розробити електронну частину та програмне забезпечення для реалізації оптимального керування приводним механізмом;

- розробити рекомендації щодо зменшення динамічних навантажень в приводному механізмі та металоконструкціях крана;
- провести аналіз техніко-економічної ефективності використання оптимального керування механізмом переміщення мостового крана.

Об'єкт дослідження – процес переміщення вантажу краном мостового типу.

Предмет дослідження – встановлення закономірностей зміни динамічних навантажень в металоконструкціях та приводному механізмі, що виникають під час переміщення крана мостового типу при ручному та оптимальному керуванні.

Методи дослідження. У процесі виконання роботи використано теоретичні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні розрахунки виконано із застосуванням методів аналітичної механіки, математичного моделювання, інтегрального, диференціального та варіаційного числення, теорії електроприводу, а також методів оптимального керування. Для проведення динамічного аналізу переміщення крана використано чисельне інтегрування диференціальних рівнянь. Розв'язання задач оптимального керування механізмом переміщення крана виконано за допомогою класичного варіаційного числення та прямих варіаційних методів. Проведення теоретичних та експериментальних досліджень режимів роботи механізму переміщення крана виконано за допомогою методу планування експериментів. При проведенні експериментальних досліджень використано сучасні методи збору та обробки даних. Для обробки отриманих експериментальних даних використано методики статистичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

уперше

- встановлено закономірності зміни динамічних навантажень в металоконструкціях та приводних механізмах кранів мостового типу в реальних умовах експлуатації при різних системах керування;

- виявлено, що при оптимізації перехідного процесу пуску для тримасової динамічної моделі крана мостового типу оптимізаційний критерій повинен включати похідні від координати не менше шостого порядку, а для чотиримасової моделі восьмого порядку;

удосконалено визначення оптимальних режимів руху механізму переміщення крана мостового типу на ділянках перехідних процесів, які до мінімуму зводять динамічні навантаження в елементах металоконструкцій та приводних механізмах;

отримали подальший розвиток встановлення крайових умов руху та побудовані математичні моделі для процесів переміщення на усталеній швидкості, гальмування та залишкових коливань для дво-, три- та чотиримасових динамічних моделей крана мостового типу, що дало змогу провести теоретичні дослідження динаміки переміщення крана.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами досліджень:

– розроблено програмне забезпечення «Оптимальне керування мостовим краном», яке дає змогу реалізовувати оптимальні режими руху, при яких динамічні навантаження в елементах металоконструкцій зводяться до мінімуму;

– розроблено мікроконтролерний пристрій, який визначає вихідні параметри крана, необхідні для роботи розробленої програми «Оптимальне керування мостовим краном»;

– запропоновано функціональну схему мікроконтролерної системи керування краном, яка дає змогу значно зменшити динамічні навантаження в елементах металоконструкцій та приводного механізму крана.

Результати досліджень передано до впровадження у ПАТ «Кам'янець-Подільськсільмаш» та використовуються при викладанні навчальної дисципліни «Динаміка і оптимізація машин» у Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи виконано здобувачем особисто, зокрема: проведено динамічний аналіз переміщення мостового крана [2,5,6]; обрано метод оптимізації та визначено оптимальні закони руху для механізму переміщення крана мостового типу, за якими зусилля в металоконструкціях та приводному механізмі крана зводяться до мінімуму [1,3,4,9,10]; для проведення експериментальних досліджень розроблено методику та підбрано вимірювально-реєструюче обладнання [11]; розроблено мікроконтролерний пристрій для визначення маси вантажу та довжини гнучкого підвісу для подальшого розрахунку масивів швидкостей механізму переміщення крана [7] та проведено експериментальні дослідження на реальній конструкції крана мостового типу [8].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: науково-практичній конференції Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2014 р.); науковій конференції молодих вчених, аспірантів і студентів (м. Київ, 2014 р.); III Міжнародній науковій конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери» (м. Київ, 2015 р.); III Міжнародній науковій конференції «Інноваційне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалива в АПК» в рамках роботи XXVII Міжнародної агропромислової виставки «Агро 2015» (м. Київ, 2015 р.); XVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2015 р.); VIII Міжнародній виставці LabComplex (м. Київ, 2015 р.); XII Міжнародній агропромисловій виставці «АгроФорум – 2015» (м. Київ, 2015 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Інженерія систем природокористування» (м. Київ, 2015р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери» в рамках III Міжнародної спеціалізованої виставки «Київський технічний ярмарок – 2016» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалив в АПК» (м. Київ, 2016 р.);

II Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології аграрного виробництва» (м. Київ, 2016 р.).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційних досліджень опубліковано у 18 наукових працях, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у наукових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, 2 статті в наукових виданнях України, патент України на корисну модель та 6 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основну частину дисертації викладено на 162 сторінках. Список використаних джерел налічує 140 найменувань. Дисертація містить 26 таблиць, 108 рисунків та 16 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «**Аналіз проблеми та постановка завдань досліджень**» розглянуто експлуатаційні режими та конструктивні особливості кранів мостового типу, проведено аналіз теоретичних та експериментальних результатів досліджень динаміки їхнього руху. Проведено аналіз результатів досліджень спрямованих на покращення динамічних параметрів під час переміщення вантажу краном, які присвячено питанням керування електроприводом та удосконалення конструкції крана.

При експлуатації кранів мостового типу близько 80 % поломок відбувається в результаті дій динамічних навантажень на їхні елементи, які виникають в результаті зміни навантажень в кранових механізмах і проявляються у вигляді перехідних процесів в їх механічних підсистемах, які мають пружну піддатливість.

Дослідженнями динаміки руху кранів мостового типу присвячено роботи таких авторів: М. П. Александрова, А. Л. Ахтулова, Д. В. Бажутиної, Д. В. Бажутина, Л. М. Бондаренка, Л. Я. Будікова, В. Ф. Гайдамаки, О. В. Григорова, А. А. Дорофєєва, С. Л. Іванова, А. Н. Каткова, О. М. Кирасирова, Л. Н. Колобова, Е. В. Комерзана, В. В. Кузьміна, Е. В. Курапової, В. С. Ловейкіна, Н. А. Лобова, А. А. Лопатина, А. В. Макурина, К. П. Манжули, А. А. Мельниченка, Д. І. Морозова, А. В. Мохнатого, О. Б. Неженцев, Ф. Палиса, А. В. Пирогова, С. В. Ракші, Ю. О. Ромасевича, Ю. Г. Сагірова, В. Ф. Семенюка, С. Л. Смолякова, В. В. Суглобова, Л. Я. Теличка, Г. І. Ткаченко, О. І. Толочка, Г. І. Фесенка, В. Я. Хижняка, Ю. В. Човнюка, Д. Г. Шимковича, Tomasz Haniszewski, Damian Gaška та ін.

При роботі механізму переміщення мостового крана на його силові елементи діють динамічні навантаження зумовлені взаємодією механізмів привода, розгойдуванням вантажу, перекосу моста, вібрацій металоконструкцій і залежать від положення візка, маси вантажу, довжини гнучкого підвісу та від самих конструктивних параметрів крана. З часом відбувається руйнування

металоконструкції опорних балок, стяжок в місцях закінчення косинки, по зварних швах у фланцевому з'єднанні стяжки з ходовим візком, тріщини по зварних швах приварки косинок у вузлах кріплення опор крана до прогінної конструкції, тріщини по зварному шву в буксовій зоні та зварних швах з'єднання вертикальної стінки з нижнім поясом в зоні зміни висоти поперечного перерізу балки. Руйнування ребр жорсткості, що підкріплюють стінку, зазвичай, починається з тріщини в місцях приварки кромки ребра до поясу, згодом тріщина поширюється на зварений шов з'єднання стінки з поясом і на основний метал. Зменшення руйнування металоконструкцій кранів мостового типу досягають за рахунок покращення їхніх динамічних характеристик. Дослідженнями, які спрямовані на покращення динамічних характеристик та режимів руху крана під час переміщення вантажу присвячено роботи: С. Е. Алави, С. В. Александровського, Д. В. Бажутіна, С. Р. Бежина, З. А. Березніченка, Л. Я. Будікова, М. А. Буракова, Ю. С. Бута, В. В. Бушера, Д. С. Васильєва, О. І. Вольченка, Р. П. Герасимяка, О. В. Григорова, Н. Ю. Дорохова, Д. М. Зюбанова, Н. В. Клімченкової, А. А. Коврижкіна, В. В. Кузьміна, С. В. Лагуненкова, В. С. Ловейкіна, В. А. Лещева, Л. В. Мельникової, А. В. Мохнатого, О. В. Найденко, О. Б. Неженцев, А. Л. Озябкина, Е. С. Окулова, І. А. Орловського, Д. А. Паламарчука, Ф. Паліса, Ю. Н. Петренка, А. В. Пирогова, Ю. О. Ромасевича, Є. Д. Слепужнікова, В. В. Стрижака, Г. І. Ткаченка, А. Л. Тогобицького, Б. І. Фираго, Н. М. Фідровської, П. В. Харламова, В. Я. Хижняка, А. І. Хиценка, Н. В. Хиценка, О. В. Чернишенка, Ю. В. Човнюка, Ю. С. Шведа, А. В. Щедринова, А. І. Шестака, Р. В. Шишкіна, F. Debrouwere, V. Gašić, D. Liu, M. Milovančević, R. Quirynen, M. Vukov, W. Wang, J. Yi, D. Zhao, Z. Zrnić та ін. Разом з тим питанням зменшенням динамічних навантажень, що діють в елементах металоконструкцій кранів за рахунок вибору режимів руху приводних механізмів приділено ще недостатньо уваги. Тому вирішення задач оптимізації режимів руху приводних механізмів кранів мостового типу для мінімізації динамічних навантажень в елементах металоконструкцій та приводних механізмів є актуальним завданням.

У другому розділі «**Динамічний аналіз руху мостового крана під час переміщення вантажу**» проведено динамічний аналіз для дво-, три- та чотиримасових динамічних моделей мостового крана. Для дослідження динаміки руху мостового крана із врахуванням приводу механізму переміщення крана та вантажу на гнучкому підвісі використано чотиримасову динамічну модель (рис. 1), яка включає в себе зведені маси m , m_1 , m_2 , m_3 відповідно вантажу, приводу, кінцевих балок та балки з крановим візком. Приведена маса приводу m_1 з'єднана з масою кінцевих балок пружним елементом з жорсткістю c_1 . До маси приводу прикладене рушійне зусилля F_p . Зведена маса кінцевих балок з'єднана з масою балки і крановим візком пружним елементом з жорсткістю c_2 . До маси кінцевих балок прикладена сила опору переміщення крана W . Приведена маса балки крана з візком з'єднана з вантажем гнучким елементом довжиною l . В цій моделі x , x_1 , x_2 , x_3 узагальнені координати

приведених мас вантажу, приводу, кінцевих балок і балки з крановим візком відповідно.

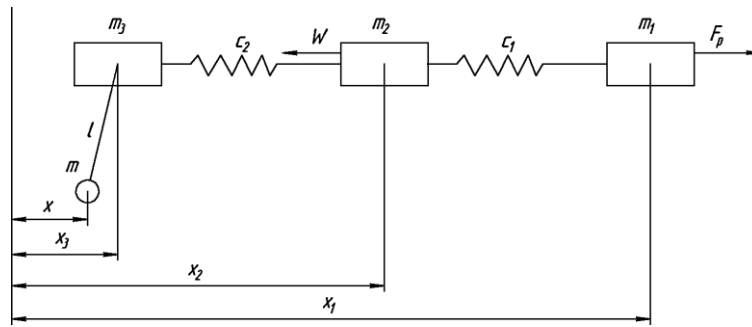


Рис. 1. Чотиримасова динамічна модель мостового крана

Динамічна модель, що зображена на рис. 1, описується наступною системою диференціальних рівнянь руху:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) = F_p; \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_1(x_1 - x_2) + c_2(x_2 - x_3) = -W; \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_2(x_2 - x_3) + \frac{mg}{l}(x_3 - x) = 0; \\ \ddot{x} - \frac{g}{l}(x_3 - x) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Математична модель (1) використовується для процесу пуску та усталеного руху. Для моделювання процесу гальмування математична модель матиме вигляд:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 = W - c(x_0 - x_1) - \frac{M_z}{R}; \\ m_1 \ddot{x}_1 = c(x_0 - x_1) - \frac{mg}{l}(x_1 - x); \\ \ddot{x} = \frac{g}{l}(x_1 - x), \end{cases} \quad (2)$$

де M_z – гальмівний момент, зведений до приводного колеса радіусом R .

Для дослідження залишкових коливань зведених мас після зупинки крана математична модель має вигляд:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = c(x_0 - x_1) + k(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) - \frac{mg}{l}(x_1 - x) - k_e(\dot{x}_1 - \dot{x}); \\ \ddot{x} = \frac{g}{l}(x_1 - x) - k_e(\dot{x}_1 - \dot{x}). \end{cases}, \quad (3)$$

де k і k_e – коефіцієнти згасання коливань металоконструкцій і вантажу відповідно.

Якщо прийняти, що жорсткість c_1 нескінченно велика, то чотиримасова динамічна модель крана (рис. 1) зведеться до тримасової. Аналогічно, якщо

масу вантажу звести до маси мостової балки крана з візком, то для таких досліджень динамічна модель крана буде двомасовою.

В результаті теоретичних досліджень три- та чотиримасової моделей з параметрами мостового крана вантажопідйомністю 20 т було виявлено, що переміщення крана супроводжується високочастотними та низькочастотними динамічними навантаженнями, які виникають за рахунок пружних властивостей металоконструкцій і приводного механізму переміщення крана та коливань вантажу відповідно (рис. 2).

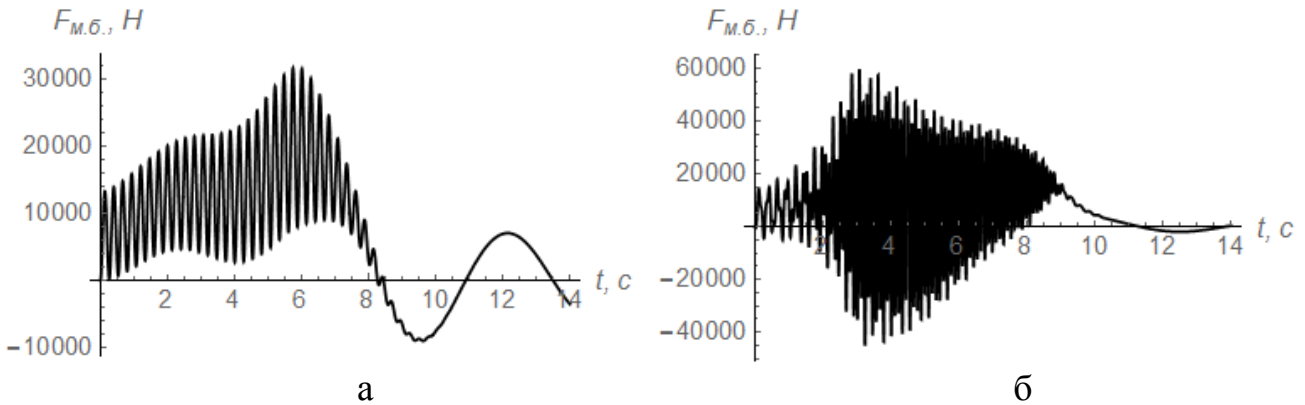


Рис. 2. Зведене динамічне зусилля в мостовій балці крана під час перехідного процесу пуску для тримасової (а) та чотиримасової (б) динамічних моделей крана

При дослідженні динаміки переміщення крана з використанням тримасової динамічної моделі крана максимальне зусилля в мостовій балці крана під час перехідного процесу пуску становить 31503 Н (рис. 2, а), рушійне зусилля – 35650 Н, а момент приводного двигуна механізму переміщення крана – 1274 Н·м.

З урахуванням приводу та пружності в кінцевих балках крана (чотиримасова динамічна модель) виникають додаткові динамічні навантаження у мостовій балці (рис. 2, б), які становлять 59782 Н і в 1,9 раза більші, ніж при дослідженні тримасової моделі. Максимальні зусилля в кінцевих балках крана знаходиться в діапазоні від -329203 до 357145 Н (рис. 3).

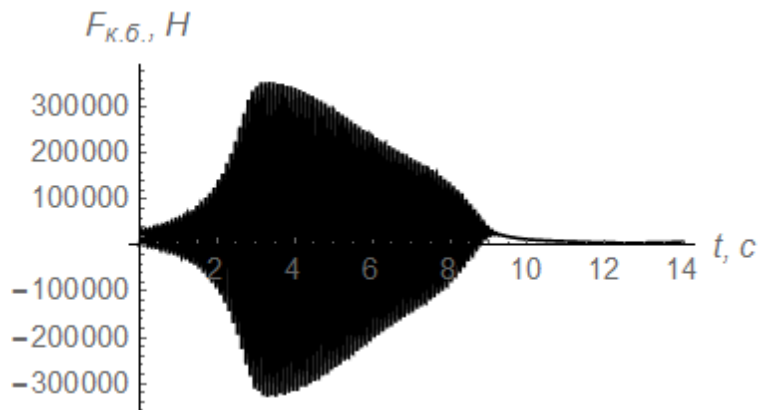


Рис. 3. Зведене динамічне зусилля, що діє в приводі механізму переміщення крана під час переміщення вантажу

Теоретичні дослідження показали, що найбільші динамічні навантаження в металоконструкції та приводному механізмі крана виникають під час перехідного процесу пуску.

У третьому розділі «**Оптимізація режимів руху крана з вантажем**» проведено оптимізацію процесу пуску механізму переміщення крана як для тримасової, так і для чотиримасової динамічних моделей мостового крана. Для процесу пуску при використанні три- та чотиримасових моделей визначено крайові умови, за яких коливання металоконструкцій та приводного механізму після закінчення перехідного процесу пуску зводяться до мінімуму:

$$\begin{cases} t = 0; x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{x} = 0; \overset{V}{\dot{x}} = 0; \\ t = t_1; x = \frac{V \cdot t_1}{2}; \dot{x} = V; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{x} = 0; \overset{V}{\dot{x}} = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} t = 0; x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{x} = 0; \overset{V}{\dot{x}} = 0; \overset{VI}{x} = 0; \overset{VII}{x} = 0; \\ t = t_1; x = \frac{V t_1}{2}; \dot{x} = V; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{x} = 0; \overset{V}{\dot{x}} = 0; \overset{VI}{x} = 0; \overset{VII}{\dot{x}} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де t – час; t_1 – тривалість процесу пуску; V – усталена швидкість переміщення крана.

Виходячи з крайових умов (4) та (5), встановлено, що для тримасової динамічної моделі крана підінтегральний вираз оптимізаційного критерію повинен мати похідні за часом від координати вантажу не менше шостого порядку, а для чотиримасової моделі – восьмого.

Для оптимізації режиму переміщення мостового крана представленого тримасовою динамічною моделлю використовувалися критерії: середньоквадратичне значення інтенсивності зміни зусилля, що виникає в мостовій балці крана та середньоквадратичне значення рушійного зусилля приводного механізму, які визначаються наступними залежностями:

$$I_{\dot{F}} = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} [\ddot{F}_{м.б.}]^2 dt \right\}^{1/2} \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$I_{F_p} = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} [F_p^2]^{1/2} dt \right\} \rightarrow \min, \quad (7)$$

де $F_{м.б.}$ – зусилля в мостовій балці; F_p – рушійне зусилля в приводному механізмі, зведене до приводного колеса; $F_{м.б.}$ та F_p – визначаються з математичної моделі крана.

В результаті проведених теоретичних досліджень для тримасової динамічної моделі крана при оптимальному керуванні під час переміщення вантажу масою 20 т і довжиною канату 7 м (рис. 4) мінімальні середньоквадратичні значення під час пуску механізму переміщення крана забезпечуються при оптимізації за критерієм середньоквадратичного значення інтенсивності зміни зусилля в мостовій балці (6).

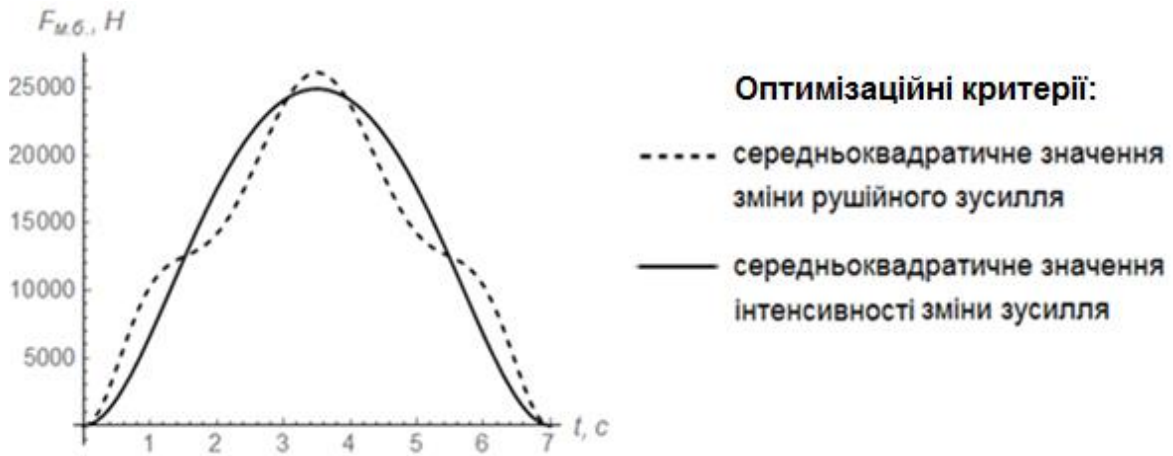


Рис. 4. Зведене зусилля, що діє в мостовій балці крана під час процесу пуску при оптимізації механізму переміщення крана, представленого тримасовою моделлю

При такому керуванні середньоквадратичні значення зусилля в мостовій балці крана становить 16313 Н, рушійного зусилля – 25671 Н, та приводного моменту механізму переміщення крана – 889 Н·м. При оптимізації перехідного процесу пуску за критерієм середньоквадратичного значення інтенсивності зміни зусилля в мостовій балці крана зменшуються максимальні значення досліджуваних параметрів в порівнянні з оптимізацією за середньоквадратичним значенням рушійного зусилля. Максимальне значення зусилля в мостовій балці крана становить 24924 Н (рис. 4), рушійне зусилля – 35222 Н, приводний момент механізму переміщення – 1219 Н·м. При такому керуванні у порівнянні з ручним, зусилля в мостовій балці зменшується у 1,26 раза, а момент двигуна – в 1,05 раза.

Для оптимізації режиму пуску механізму переміщення крана, представленого чотиримасовою динамічною моделлю використовувався комплексний критерій, в який входять середньоквадратичні значення зусилля в мостовій балці крана $F_{м.б.}$, сила інерції, що діє на вантаж $F_{i.в.}$ та зусилля, що виникає в кінцевих балках крана $F_{к.б.}$. Оптимізаційний критерій представлено у вигляді інтегрального функціоналу:

$$I = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \left[\delta_1 \cdot \left(\frac{F_{м.б.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_2 \cdot \left(\frac{F_{i.в.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_3 \cdot \left(\frac{F_{к.б.}}{m \cdot g} \right)^2 + \delta_4 \cdot \left(\frac{\frac{1}{2} m \cdot x^{viii}}{\tilde{I}} \right)^2 \right] dt \right\}^{1/2} \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ – вагові коефіцієнти, що враховують долю кожної складової в

критерії; $\frac{1}{2} m \cdot x^{viii}$ – додаткова складова, яка введена штучно для підняття

порядку рівняння, щоб забезпечити крайові умови (5), а $\tilde{I} = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \frac{1}{2} m \cdot \left(\tilde{x} \right) dt$, тут

^{viii}
 \tilde{x} – оптимальний закон руху за критерієм додаткової складової в (8). Для того, щоб додаткова складова не значно впливала на величину критерію (8) ваговий коефіцієнт δ_4 приймається на декілька порядків меншим в порівнянні з коефіцієнтами $\delta_1, \delta_2, \delta_3$.

Аналогічно, як для тримасової динамічної моделі, режими керування за різними оптимізаційними критеріями під час перехідного процесу пуску, оцінено за максимальними та середньоквадратичними значеннями приведенного зусилля в мостовій балці крана та в кінцевих балках крана і представлено у вигляді графічних залежностей (рис. 5) та (рис. 6) відповідно.

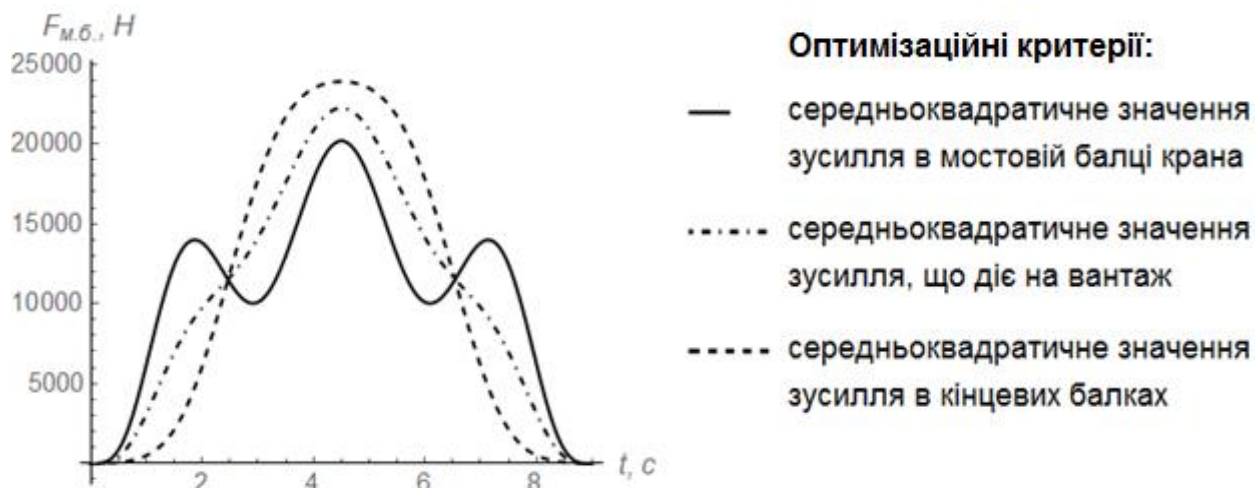


Рис. 5. Зведене зусилля, що діє в мостовій балці крана під час перехідного процесу пуску (при використанні чотиримасової динамічної моделі крана)

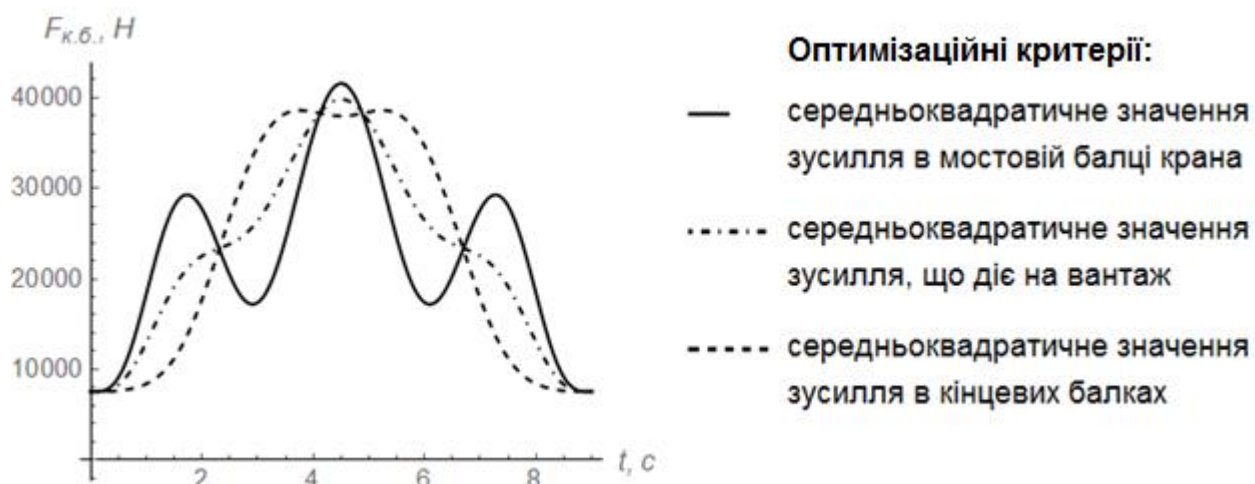


Рис. 6. Зведене зусилля в приводі механізму переміщення крана під час перехідного процесу пуску (при оптимізації чотиримасової динамічної моделі крана)

Отримані дані дають змогу стверджувати, що для зменшення середньоквадратичних значень динамічних навантажень, що діють на металоконструкцію крана, найкращий ефект досягається при розв'язку оптимізаційної задачі з ваговими коефіцієнтами $\delta_1 = 0,99999$, $\delta_2 = 0$, $\delta_3 = 0$,

$\delta_4 = 0,00001$. Таке керування забезпечує середньоквадратичне значення зусилля в мостовій балці крана 12043 Н, зусилля в кінцевих балках 24674 Н, рушійне зусилля 25666 Н, приводний момент двигунів 888 Н·м, та максимальний кут відхилення вантажного канату від вертикалі $1,744^\circ$. Таке керування забезпечує зменшення максимального зусилля в мостовій балці крана в 2,96 раза, яке становить 20181 Н. Зменшення максимальних зусиль в кінцевих балках крана, рушійного та пружного моменту приводного двигуна забезпечується при вагових коефіцієнтах $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0$, $\delta_3 = 0,99999$, $\delta_4 = 0,00001$ і становлять відповідно 38606 Н, 40027 Н та 1385 Н·м. Максимальне значення зусилля в кінцевих балках крана зменшується в 9,25 раза в порівнянні з ручним керуванням.

У четвертому розділі «Програма та методика експериментальних досліджень» обґрунтовано вибір обладнання для проведення експериментальних досліджень динаміки переміщення мостового крана, розроблено мікроконтролерний пристрій, який визначає вихідні параметри крана, необхідні для роботи розробленої програми «Оптимальне керування мостовим краном» та підібране обладнання для реалізації оптимальних режимів керування. При проведенні експериментальних досліджень швидкість переміщення кінцевих балок крана вимірюється за допомогою лінійних енкодерів, а прискорення акселерометрами (рис. 7).

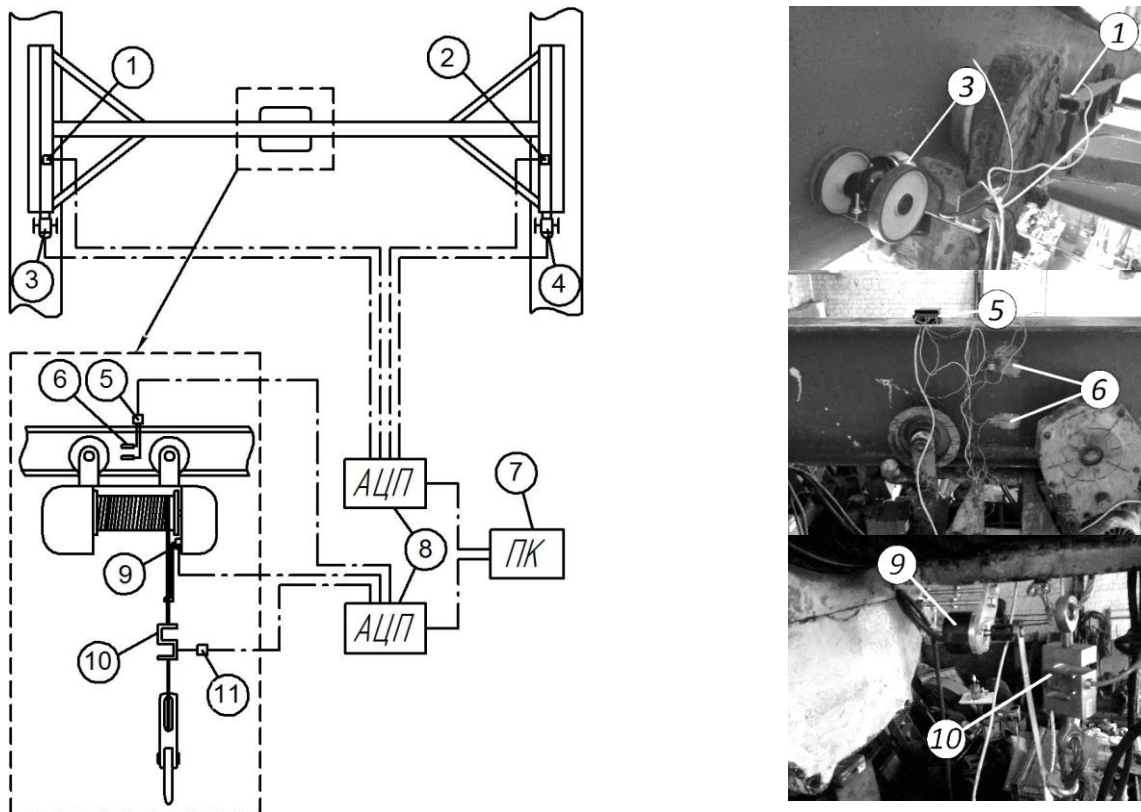


Рис. 7. Розташування датчиків: 1, 2 – акселерометри; 3, 4 – лінійні енкодери; 5 – підсилювач для тензорезисторів; 6 – тензорезистори на мостовій балці крана; 7 – комп'ютер для збору даних; 8 – аналого-цифрові перетворювачі; 9 – кутовий енкодер; 10 – S-подібний тензодатчик; 11 – підсилювач сигналу з S-подібного тензодатчика

Коливання вантажу вимірюються кутовим енкодером, що кріпиться на електроталі. Для передачі коливань вантажу вал енкодера з'єднувався через муфту із штангою, яка другим кінцем з'єднувалася з вантажним канатом. Зусилля в мостовій балці крана визначалось за допомогою тензорезисторів, сигнал яких підсилювався за допомогою інструментального підсилювача. Після приклеювання тензорезисторів до мостової балки крана виконувалося тарування за допомогою попередньо відтарованого S-подібного тензодатчика, сталених канатів та двох талрепів. До мостової балки крана прикладалося зусилля шляхом закручування талрепу, до якого прикріплювався S-подібний тензодатчик, останній за допомогою канату з'єднувався з кронштейном у вигляді скоби закріпленій на стіні. Зусилля в канаті вимірювалось за допомогою S-подібного тензодатчика.

Вимірювальне обладнання підключалось до входів аналого-цифрового перетворювача. Електричні сигнали, що приходили з датчиків під час переміщення крана реєструвалися з подальшим збереженням на комп'ютері у вигляді масивів, що дало змогу провести обробку та аналіз режимів керування.

Для реалізації оптимального керування механізмом переміщення крана використано частотний перетворювач, який має комунікаційний інтерфейс RS-485 (рис. 8). Програмне забезпечення «Оптимальне керування мостовим краном» працює в парі з розробленим мікроконтролерним пристроєм, останній за допомогою датчиків визначає масу вантажу (S-подібний тензодатчик) та довжину гнучкого підвісу (лінійний енкодер), що необхідно для розрахунків масивів швидкостей, щоб в подальшому реалізовувати оптимальне керування механізмом переміщення крана. Сплановано програму проведення експериментальних досліджень та вибрано методику обробки отриманих даних.

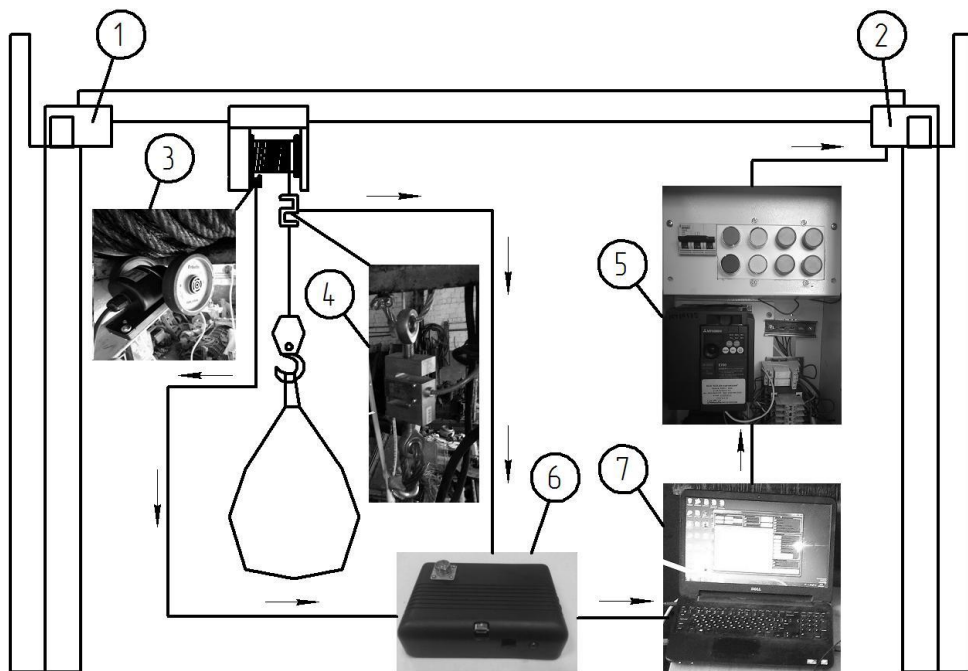


Рис. 8. Система для реалізації оптимального керування: 1, 2 – двигуни механізму переміщення крана; 3 – датчик довжини канату; 4 – датчик маси вантажу; 5 – частотний перетворювач; 6 – мікроконтролерний пристрій; 7 – комп'ютер з програмним забезпеченням

У п'ятому розділі «Результати експериментальних досліджень та рекомендації щодо впровадження» отримані дані експериментальних досліджень при ручному та оптимальному керуванні оброблено та представлено у вигляді графічних залежностей. При обробці даних отриманих з тензодатчиків використано високочастотний фільтр. Пікові динамічні навантаження при ручному керуванні виникають саме під час перехідного процесу пуску, так, наприклад, при переміщенні вантажу масою 192 кг з довжиною гнучкого підвісу 3,1 м зусилля в мостовій балці крана становить 1139 Н (рис. 9, а), також при переміщенні крана на усталеній швидкості динамічні навантаження виникають від коливань вантажу, амплітуда яких становить 503 Н. Оптимальне керування забезпечує зменшення пікових зусиль в мостовій балці, що виникають під час перехідного процесу пуску, максимальне значення якого становить 408 Н, що на 64 % менше ніж при ручному керуванні – експеримент № 2. При переміщенні крана на усталеній швидкості динамічні зусилля в крановому мості незначні і знаходяться в межах ± 146 Н, що на 71 % менше в порівнянні з ручним керуванням. Пікові значення відхилення вантажного канату від вертикалі при оптимальному керуванні для експерименту № 8 зменшуються на 57 % в порівнянні з ручним керуванням (рис. 9, б) – експеримент № 4. Слід відмітити, що під час переміщення крана на усталеній швидкості амплітуда відхилення вантажу знаходиться в межах $\pm 0,7^\circ$.

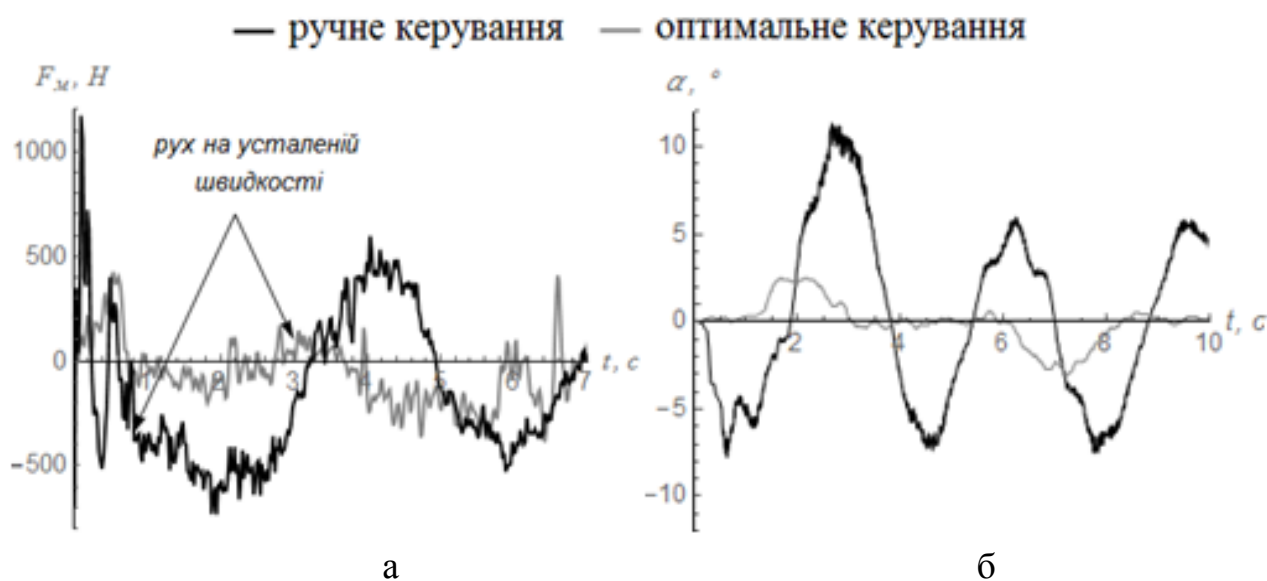


Рис. 9. Зусилля, що діє на мостову балку крана у горизонтальній площині (а) та коливання вантажу відносно вертикалі (б) під час переміщення при оптимальному та ручному керуванні

Отриманні дані з акселерометрів показали, що розгін крана при ручному керуванні супроводжується різкою зміною прискорення кінцевих балок крана (рис. 10, а), максимальне значення яких становить 4,31 і 4,19 m/s^2 для лівої та правої балок відповідно.

Максимальні значення прискорень кінцевих балок на початку переміщення крана свідчить, що саме під час пуску механізму переміщення крана виникають в металоконструкції крана пікові динамічні навантаження.

Після зупинки вібрації крана плавно затухають протягом 3,2 с. При оптимальному керуванні прискорення кінцевих балок нарастають плавно (рис. 10, б), максимальні значення досягаються під час переміщення крана на усталеній швидкості, які становить для лівої балки $2,79 \text{ м/с}^2$, а для правої – $3,11 \text{ м/с}^2$. Така різниця зумовлена тертям коліс об реборди та нерівностями підкранового шляху.

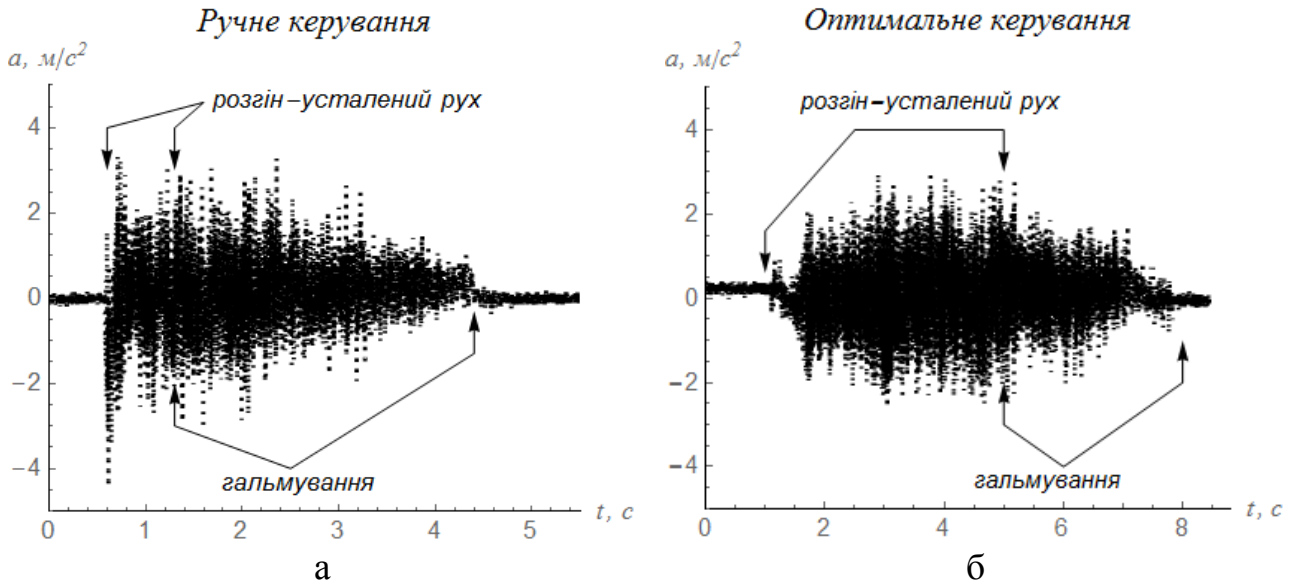


Рис. 10. Прискорення коливань правої кінцевої балки в горизонтальній площині при переміщенні крана при (а) ручному та (б) оптимальному керуванні

При порівнянні максимальних значень прискорень під час всього процесу переміщення крана оптимальне керування дає змогу значення останнього зменшити на 35 % для лівої балки, а для правої – на 26 %. Слід відмітити, що при оптимальному керуванні під час пуску механізму переміщення крана прискорення нарастають плавно без різких ривків.

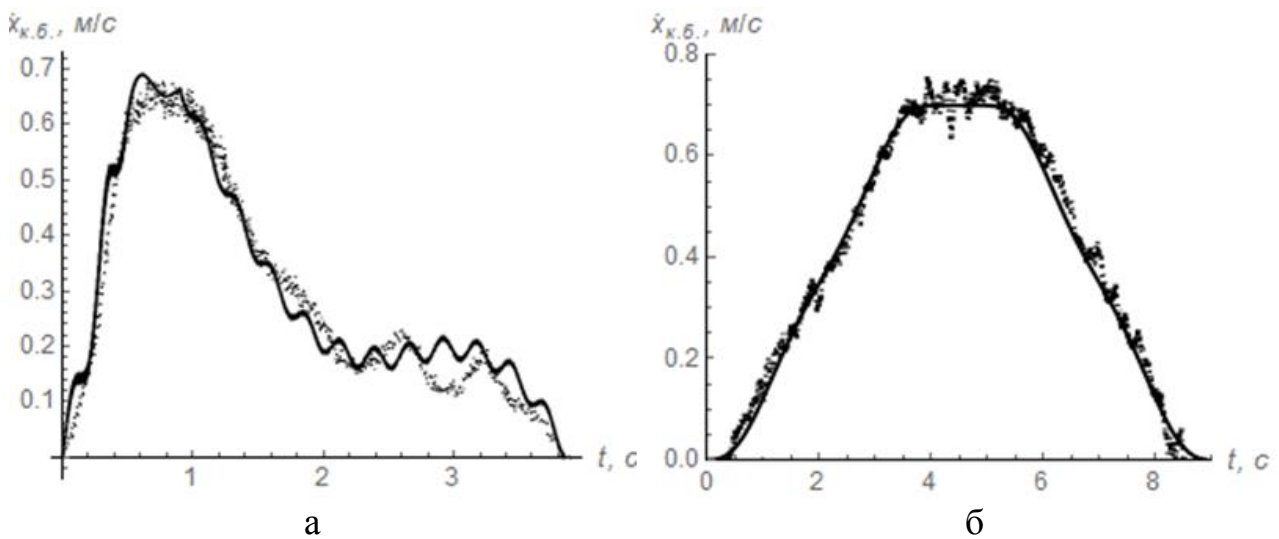


Рис. 11. Швидкість крана при ручному (а) та оптимальному керуванні (б)

Для перевірки реалізації керуючого впливу та порівняння теоретичних і експериментальних даних при ручному та оптимальному керуванні приводом

механізму переміщення крана швидкість лівої кінцевої балки крана винесено на відповідно на рис. 11, а та рис. 11, б. При оптимальному керуванні з часом перехідних процесів 4 с (рис. 11, б) видно, що кран розганяється плавно, після досягнення усталеної швидкості при експериментальному дослідженні відбуваються незначні коливання швидкості, це зумовлено нерівністю підкранового шляху та тертям об реборди коліс.

При переміщенні краном вантажу масою 192 кг з довжиною канату 2,5 м при ручному керуванні коефіцієнт варіації для переміщення лівої та правої кінцевих балок становлять 23,3 та 23,3 % відповідно, а для швидкості кінцевих балок при оптимальному керуванні з часом перехідних процесів 4 с 5,9 та 5 %.

Для розроблення повноцінної системи керування, яка працює без участі комп'ютера та дає змогу реалізовувати оптимальне керування, що зменшує динамічні навантаження в металоконструкції мостового крана запропоновано функціональну схему на базі мікроконтролера (рис. 12).

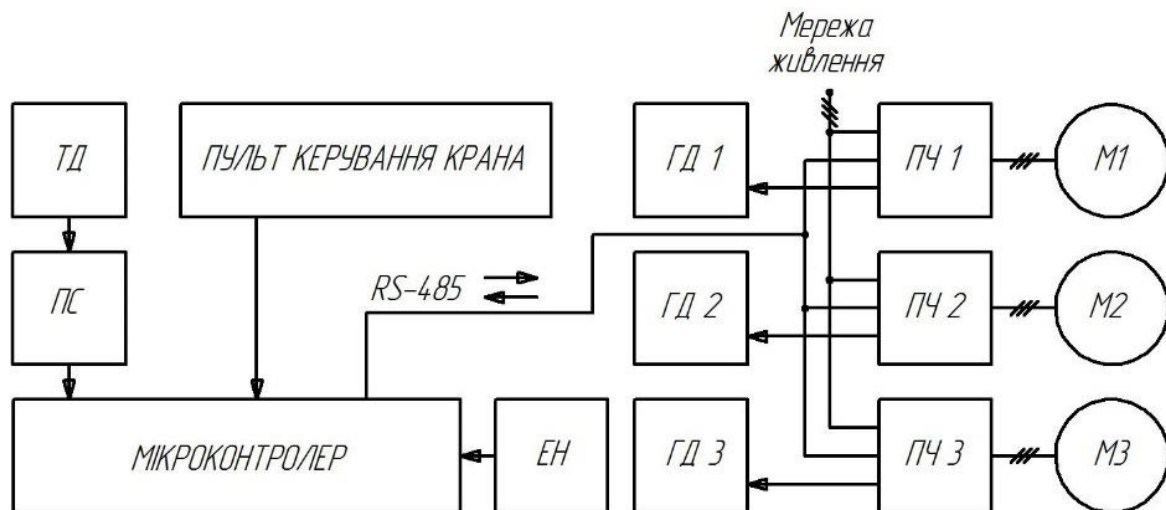


Рис. 12. Функціональна блок схема системи оптимального керування мостовим краном: ТД – тензодатчик; ПС – підсилювач сигналу тензодатчика; ЕН – енкoder; ГД – гальма двигуна; ПЧ – перетворювач частоти; М – приводний двигун.

Для прийнятого у розрахунках мостового крана вантажопідйомністю 20 т визначено річну економічну ефективність використання оптимальних законів руху механізмів переміщення крана, яка рівна вартості зекономленої електроенергії за рахунок зменшення енерговитрат у кранових електроприводах і складає 16441 грн/рік.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел за темою дисертаційної роботи показав, що дослідженнями динаміки переміщення кранів мостового типу займаються як в Україні, так і закордоном, разом з тим дослідженнями спрямованими на обґрунтування перехідних режимів під час переміщення вантажопідйомних кранів приділено недостатньо уваги.

2. Динамічний аналіз для дво-, три- та чотиримасових динамічних моделей переміщення кранів мостового типу умовно розділено на: перехідний процес пуску, усталений рух, гальмування та залишкові коливання після зупинки крана, для яких встановлені крайові умови руху. В результаті досліджень динамічних навантажень в мостовій та кінцевих балках крана встановлено, що найбільші пікові динамічні навантаження на металоконструкцію виникають саме під час пуску крана. Так, наприклад, для мостового крана при переміщенні вантажу 20 т і довжиною гнучкого підвісу 7 м навантаження при дослідженні тримасової моделі під час пуску в 4,49 раза перевищують навантаження на усталеному режимі руху відповідно 7016 та 31503 Н. Для чотиримасової моделі крана зусилля в балці на усталеній швидкості становить 1517 Н, а під час пуску – 59783 Н, що в 39,4 рази більші у процесі пуску у порівнянні з усталеним рухом.

3. Переміщення крана супроводжується високочастотними та низькочастотними коливаннями металоконструкцій. Високочастотні коливання виникають за рахунок пружних властивостей металоконструкцій, а низькочастотні за рахунок коливань вантажу. Максимальне значення зусилля в мостовій балці для тримасової моделі під час пуску крана становить 66328 Н, а під час переміщення крана на усталеній швидкості – 21584 Н. Крім того, для чотиримасової динамічної моделі крана ці зусилля становить 77096 і 10553 Н відповідно. Максимальні зусилля в приводі під час пуску становлять 322051 Н, а під час переміщення крана на усталеній швидкості – 33574 Н. Наведені результати показують значне збільшення динамічних навантажень на елементи металоконструкцій та приводу під час перехідних процесів в порівнянні з усталеним рухом крана. Значення динамічних навантажень, які виникають від коливання вантажу, в значній мірі залежать від його маси. Залишкові коливання вантажу після зупинки крана також мають вплив на динамічні навантаження, що діють на елементи металоконструкцій.

4. Для оптимізації перехідного процесу пуску механізму переміщення крана встановлені крайові умови, при яких забезпечується реалізація оптимального керування за встановленими законами руху. При цьому виявлено, що для тримасової динамічної моделі крана оптимізаційний критерій повинен включати похідні від координати не менше шостого порядку, а для чотиримасової – восьмого.

5. Проведений синтез оптимальних законів руху мостового крану дав змогу розробити систему керування, за допомогою якої динамічні навантаження, що діють на елементи металоконструкцій та привід механізму переміщення крана, а також відхилення вантажного канату від вертикалі під час переміщення крана зводиться до мінімуму. Так, наприклад, для мостового крана при переміщенні вантажу 20 т із довжиною гнучкого підвісу 7 м під час пуску зусилля в мостовій балці крана зменшується в 2,96 раза, а зусилля в кінцевих балках – в 9,25 раза.

6. Для реалізації оптимального керування механізмом переміщення крана запропоновано використовувати зовнішнє керування частотним перетворювачем за допомогою розробленої програми і мікроконтролерного

пристрою, який визначає масу вантажу та довжину гнучкого підвісу, в результаті чого відбувається розрахунок масивів частоти напруги живлення приводних електродвигунів механізму переміщення крана з подальшим забезпеченням оптимального керування.

7. Оптимальне керування електроприводом механізму переміщення мостового крана дає змогу зменшити пікові значення динамічних навантажень в мостовій балці крана, так, наприклад, при переміщенні вантажу масою 192 кг, закріпленому на гнучкому підвісі довжиною 2,5 м під час перехідного процесу пуску зусилля в мостовій балці крана зменшується на 64 % в порівнянні з ручним керуванням, а при переміщенні крана на усталеній швидкості динамічні зусилля в крановому мості зменшуються на 71 %. Зусилля в канаті зменшуються на 49 %, а при переміщенні крана на усталеній швидкості на 61 %. Відхилення вантажного канату від вертикалі зменшується на 57 %. Під час переміщення крана на усталеній швидкості амплітуда відхилення знаходиться в межах $\pm 0,7^\circ$. Отримані данні з акселерометрів показали, що прискорення кінцевих балок при пуску крана на природній характеристиці електродвигунів механізму переміщення крана відразу досягають пікових значень, а при оптимальному керуванні змінюються плавно.

8. Для реалізації оптимального керування запропоновано функціональну схему системи керування краном на базі мікроконтролера, яка дає змогу розраховувати масиви частоти напруги живлення електродвигунів, з використанням даних отриманих з датчиків, котрі необхідні для підстановки у синтезований закон, що описує швидкість приводу під час переміщення крана за оптимальним режимом.

9. Розраховано економічний ефект від впровадження системи оптимального керування мостовим краном. Розрахунок економічного ефекту включав скорочення робочого циклу крана та зменшення втрат електроенергії в обмотках приводного електродвигуна механізму переміщення і становить 16441 грн/рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Зменшення динамічних зусиль у крановому мості шляхом оптимізації режимів руху крана. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 196. Ч. 1. С. 112–122. *(Здобувачем проведено оптимізацію перехідного процесу пуску механізму переміщення мостового крана для тримасової моделі).*

2. Лисенко В. П., Ловейкін В. С., **Крушельницький В. В.** Динамічний аналіз мостового крана. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 212. Ч. 1. С. 246–255. *(Здобувачем проведено аналіз чотиримасової динамічної моделі крана).*

3. Ловейкін В. С., **Крушельницький В. В.** Зменшення динамічних навантажень на металоконструкції прольотних кранів шляхом оптимізації перехідного процесу пуску крана за комплексним критерієм. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 254. Ч. 1. С. 136–143. *(Здобувачем проведено оптимізацію перехідного процесу пуску для тримасової динамічної моделі крана за комплексним критерієм).*

4. Ловейкін В. С., **Крушельницький В. В.** Оптимальні режими керування механізмом переміщення мостового крана. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 258. С. 204–216. *(Здобувачем проведено оптимізацію перехідного процесу пуску для чотиримасової динамічної моделі крана).*

5. Ловейкін В. С., **Крушельницький В. В.** Динамічний аналіз переміщення мостового крана з урахуванням механічної характеристики приводного двигуна. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 262. С. 27–38. *(Здобувачем проведено динамічний аналіз руху мостового крана).*

Статті у наукових виданнях України,

включених до міжнародних наукометричних баз даних:

6. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Аналіз динамічних моделей руху мостового крана при горизонтальному переміщенні. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2015. Вип. 85. С. 5–13. *(Здобувачем проведено аналіз дво- та тримасових динамічних моделей крана).*

7. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Розробка блоку зворотного зв'язку для реалізації оптимальних законів руху мостового крана. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2016. Вип. 87. С. 28–33. *(Здобувачем розроблено мікроконтролерний пристрій для визначення маси вантажу та довжину гнучкого підвісу для подальшого розрахунку масивів швидкостей механізму переміщення крана).*

8. Ловейкін В. С., **Крушельницький В. В.** Експериментальні дослідження динаміки переміщення прольотного крана при оптимальному керуванні. Інтернаука. 2016. № 12 (22). Т. 1. С. 110–112. *(Здобувачем проведено аналіз експериментальних досліджень).*

Стаття у науковому виданні іншої держави

9. Loveykin V., **Krushelnytskyi V.** Optimization of start mode bridge crane on criterion mean square value of driving force. Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016. Vol. 18. No 3. P. 82–89. *(Здобувачем проведено оптимізацію перехідного процесу пуску механізму переміщення крана за рушійним зусиллям).*

Статті в наукових виданнях України:

10. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Оптимізація перехідного процесу пуску механізму переміщення мостового крана за критерієм середньоквадратичного значення зусилля у мостовій балці. Підйомно-транспортна техніка. 2015. Вип. 3 (47). С. 27–35. *(Здобувачем проведено оптимізацію перехідного процесу пуску для чотиримасової динамічної моделі крана).*

11. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Апаратне забезпечення для дослідження динаміки руху мостового крана. Підйомно-транспортна техніка. 2016. Вип. 2 (50). С. 25–33. *(Здобувачем запропоновано вимірально-реєструюче обладнання).*

Патент України на корисну модель

12. Патент на корисну модель 111103 Україна, МПК В66С 13/18 (2006.01). Спосіб керування механізмом переміщення прольотного крана. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.**; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № у 201606571; заявлено 15.06.2016; опубліковано 25.10.2016; Бюлетень № 20. *(Здобувачем удосконалено спосіб керування механізмом переміщення прольотного крана).*

Тези наукових доповідей:

13. Ловейкін В. С., **Крушельницький В. В.** Мінімізація динамічних навантажень в металоконструкції при переміщенні прольотних кранів. 75 науково-практична конференція Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, 15–18 квітня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 25–27. *(Здобувачем проведено оптимізацію перехідного процесу пуску крана для тримасової динамічної моделі крана).*

14. Ловейкін В. С., **Крушельницький В. В.** Динамічний аналіз переміщення мостового крана. Інноваційний розвиток аграрної сфери: III Міжнародна наукова конференція в рамках роботи 15-ї Міжнародної спеціалізованої виставки-ярмарку «Україна аграрна 2015», м. Київ, 19–21 березня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 77–79. *(Здобувачем проведено динамічний аналіз тримасової динамічної моделі крана).*

15. Крушельницький В. В. Вимірально-реєструюче обладнання для проведення експериментального дослідження динаміки руху мостового крана. Інженерія систем природокористування: Міжнародна науково-практична конференція в рамках роботи XII Міжнародної агропромислової виставки «Агрофорум – 2015», м. Київ, 11 листопада: тези доповіді. К., 2015. С. 28–29. *(Здобувачем запропоновано вимірально-реєструюче обладнання для проведення експериментальних досліджень).*

16. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Мехатронная система для реализации оптимальных законов движения мостового крана. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: Международная заочная научно-практическая конференция,

г. Воронеж, Российская Федерация, 2015 год: тезисы доклада. Воронеж, 2015. С. 321–324. *(Здобувачем запропоновано систему для реалізації оптимального керування).*

17. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Розробка апаратної частини системи керування рухом мостового крана. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природо-користування: конструювання та дизайн: XVI Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 23–25 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 23–25. *(Здобувачем розроблено мікроконтролерний пристрій для системи керування крана).*

18. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., **Крушельницький В. В.** Система керування рухом мостового крана. Інноваційний розвиток аграрної сфери: IV Міжнародна науково-практична конференція в рамках III Міжнародної спеціалізованої виставки «Київський технічний ярмарок – 2016», м. Київ, 29 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 16–17. *(Здобувачем запропоновано систему керування рухом мостового крана).*

АНОТАЦІЯ

Крушельницький В. В. Обґрунтування динамічних режимів переміщення вантажопідійомних кранів мостового типу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.05 «Піднімально-транспортні машини». – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2017.

У дисертації наведено дослідження, що мають за мету підвищення ефективності кранів мостового типу за рахунок зменшення динамічних навантажень у металоконструкції та приводному механізмі під час переміщення крана шляхом оптимізації перехідних режимів руху механізму переміщення.

Проведено динамічний аналіз переміщення мостового крана з використанням дво-, три- та чотиримасових динамічних та математичних моделей. Встановлено основні причини виникнення динамічних навантажень, які виникають в металоконструкції та приводному механізмі мостового крана.

Оптимізовано перехідний процес пуску механізму переміщення мостового крану для три- та чотиримасової динамічної моделі за різними оптимізаційними критеріями та проведено аналіз теоретичного дослідження оптимального керування.

Розроблено систему керування приводом механізму переміщення мостового крана, яка забезпечує реалізацію оптимального керування. Для підтвердження теоретичних розрахунків підібрано вимірювально-реєструюче обладнання та проведено експериментальні дослідження динаміки мостового крана при різних режимах керування.

На основі результатів досліджень запропоновано рекомендації щодо розроблення системи керування мостовим краном, використання якої дає змогу звести динамічні навантаження на металоконструкцію та приводний механізм під час переміщення крана до мінімуму.

Ключові слова: мостовий кран, динамічні навантаження, перехідний процес пуску, оптимізація, система керування.

АННОТАЦІЯ

Крушельницький В. В. Обоснование динамических режимов перемещения грузоподъемных кранов мостового типа. – 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, 2017.

В диссертации приведены исследования, имеющие целью повышение эффективности кранов мостового типа за счет уменьшения динамических нагрузок в металлоконструкции и приводном механизме при перемещении крана путем оптимизации переходных режимов движения механизма перемещения.

Проведен динамический анализ перемещения мостового крана с использованием двух-, трех- и четырехмассовых динамических и математических моделей. Выявлено, что пиковые динамические нагрузки в металлоконструкции возникают именно во время переходного процесса пуска и обусловленные упругими свойствами металлоконструкции и отклонением грузового каната от вертикали, а при перемещении крана на устоявшейся скорости динамические нагрузки возникают за счет колебаний груза.

Оптимизирован переходный процесс пуска механизма перемещения мостового крана для трёхмассовой динамической модели крана по критерию среднеквадратического значения интенсивности изменения усилия в мостовой балке крана и движущего усилия. Для четырёхмассовой динамической модели использовался комплексный критерий, в который входили среднеквадратичные значения усилий в мостовой и концевых балках крана, а также сила инерции, действующая на груз. Оптимизационные критерии представляют собой интегральные функционалы, которые необходимо минимизировать. Решение оптимизационных задач позволило провести анализ теоретического исследования оптимального управления. Для решения дифференциальных уравнений использовались как прямой, так и приближенный методы. Минимальные среднеквадратичные значения при пуске механизма перемещения крана обеспечиваются при оптимизации по критерию среднеквадратического значения движущего усилия для трёхмассовой модели крана, а максимальные значения динамических нагрузок уменьшаются при оптимизации переходного процесса пуска по критерию среднеквадратического значения изменения интенсивности усилия в мостовой балке крана.

Реализация оптимального управления выполняется с помощью частотного преобразователя, разработанного микроконтроллерного устройства и программного обеспечения. Микроконтроллерное устройство определяет исходные данные с помощью датчиков и работает в паре с программным

обеспечением, которое, в свою очередь, использует полученные данные и рассчитывает массивы скоростей и передает управляющий сигнал частотному преобразователю, последний руководит приводом механизма перемещения крана. Для подтверждения теоретических расчетов подобрано измерительно-регистрирующее оборудование и проведены экспериментальные исследования динамики мостового крана при различных режимах управления.

На основе результатов исследований предложено блок-схему системы управления крановыми механизмами на базе микроконтроллера, использование которой позволяет свести динамические нагрузки на металлоконструкцию и приводной механизм при перемещении крана до минимума.

Ключевые слова: пролетный кран, динамические нагрузки, переходный процесс пуска, оптимизация, система управления.

ANNOTATION

Krushelnyskyi V. V. Justification the dynamic modes movement load-lifting cranes of bridge type. – The 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, 2017.

In the thesis are studies that are intended to reduce the dynamic increase in load metal tap while moving the crane by optimizing the transitional regime starter motor mechanism for moving the crane.

A dynamic analysis of tap span displacement using two-, three- and fourmass dynamic and mathematical models. The basic causes of the dynamic loads that arise in the metal span crane.

Optimized transition process start the electric mechanism for moving the crane to span three and fourmass dynamic model of the crane on various optimization criteria and analyzed the theoretical study of optimal control.

The system of the drive mechanism for moving the crane span, which ensures the implementation of optimal control. To confirm the theoretical calculations matched measurement and filing equipment and conducted experimental research on bridge cranes.

Based on the research results offered recommendations to develop control systems span crane, the use of which allows to reduce dynamic loads on the metal structure when moving the crane to a minimum.

Key words: crane span, dynamic load transient start-up, optimization, control system.

Підписано до друку 31.08.2017 р.
Ум. друк. арк. 0,9
Наклад 100 прим.

Формат 60×80/16
Обл.-вид. арк. 0,9
Зам. № 9365.

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв оборони, 15, Київ-41, 03041
тел.: 527-81-55