

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Кадикала Івана Олександровича** за темою **«Оптимізація перехідних режимів руху механізму повороту стрілового крана»**, що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.05 – піднімально - транспортні машини.

Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 235 сторінок комп'ютерного тексту, 30 сторінок додатків та 18 сторінок списку використаних джерел із 190 найменувань. Дисертація містить 94 ілюстрації, 17 таблиць.

Актуальність обраної теми. При роботі стрілового крана найбільші динамічні навантаження виникають в процесах пуску і гальмування механізму повороту, що приводить елементи крану до циклічних перевантажень та пошкоджень. Коливання вантажу, які виникають при повороті крану ускладнюють прицільне наведення гакової підвіски вантажозахоплюючого пристрою на вантаж і позиціювання вантажу, що зменшує продуктивність крану та його надійність роботи. Проблема мінімізації динамічних навантажень у приводі та металоконструкції є досить актуальною на даний час. Розв'язання оптимізаційної задачі в напрямку зменшення динамічних навантажень та усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі під час роботи механізму повороту стрілового крану дозволить значно поліпшити роботу всього крану і продовжити строк його експлуатації.

Подана дисертаційна робота направлена на підвищення ефективності роботи стрілових кранів за рахунок оптимізації перехідних режимів руху механізму повороту.

Робота виконана згідно з науково-дослідною тематикою кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України: «Наукове обґрунтування і розробка методів

динамічного моделювання та режимно-параметричної оптимізації сучасних вантажопідійомних машин» (номер державної реєстрації 0119U100848); «Динамічна оптимізація вантажопідійомних та транспортуючих машин в агропромисловому виробництві» (номер державної реєстрації 0118U004170).

Ступінь обґрунтованості наукових положень.

Наведені в дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації є достовірними та належно обґрунтованими.. Для цього автором проведені необхідні теоретичні та експериментальні дослідження.

Дисертація та автореферат вміщують достатню кількість розрахункових схем, графічного пояснювального матеріалу, таблиць, експериментального обладнання та алгоритму роботи мехатронної системи механізму повороту стрілового крана.

Достовірність отриманих результатів підтверджується застосуванням методів теоретичної та аналітичної механіки, теорії машин і механізмів, математичного моделювання, диференціального, інтегрального та варіаційного числення, теорії автоматичного керування, модифікованого методу рою часточок ME-PSO. В дисертації використана комп'ютерна програма «Wolfram Mathematica v.11». При фізичному моделюванні застосовано теорію подібності технічних об'єктів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

- побудовано математичну модель динаміки руху механізму повороту, на основі якої вперше проаналізовано динамічні характеристики стрілової системи при повороті крана, що дало можливість встановити перспективні напрямки удосконалення механізму повороту;
- оптимізовано режими повороту стрілового крана за одиничними інтегральними критеріями, які зменшують динамічні навантаження та коливання вантажу на гнучкому підвісі;
- розроблено безрозмірний комплексний інтегральний динамічний критерій для оцінки режиму повороту стрілового крану, який включає дію динамічних навантажень і швидкість їхньої зміни в часі, що дало можливість провести більш повну оптимізацію режиму руху механізму повороту крана;

- виявлено закономірності зміни рушійного моменту приводу механізму повороту стрілового крану в процесі пуску, які до мінімуму зводять дію динамічних навантажень;
- обґрунтовано і експериментально підтверджено використання оптимальних режимів руху для керування приводу механізму повороту стрілового крану.

Повнота викладу наукових положень в опублікованих працях. За результатами дисертаційних досліджень загалом опубліковано 32 наукові праці, у яких наведені основні наукові результати дисертаційної роботи, зокрема 7 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні України, включеному до міжнародної наукометричної бази даних, 2 статті у наукових виданнях іншої держави, 19 тез доповідей на наукових конференціях, 2 патенти України на корисні моделі та 1 монографія.

Опубліковані праці у достатньому обсязі охоплюють розділи дисертації, досить повно віддзеркалюють наукові положення та практичні рекомендації, що виносяться на захист дисертації.

По кожній опублікованій роботі у співавторстві, окремо зазначений особистий внесок здобувача.

Практична цінність роботи полягає в:

- розробці методики оптимізації режиму руху механізму повороту стрілового крану під час перехідних процесів;
- розробці конструкції приводного механізму, що дозволяє реалізувати оптимальні режими руху механізму повороту стрілового крана;
- здійснити оптимальне керування рухом механізму повороту за допомогою розробленої комп'ютерної програми «optimal control of the jib crane turning mechanism»;
- результати досліджень використані в навчальному процесі при вивченні дисциплін «Підйомно-транспортні машини» під час проведення лабораторних робіт та «Динаміка і оптимізація машин» при розробці лекційного курсу для

магістрів дослідників зі спеціальності «Галузеве машинобудування» (Акт впровадження результатів дисертації в навчальний процес від 08.02.2021).

У **першому розділі** досить докладно розглянуто особливості конструкції та режимів роботи механізмів повороту стрілових кранів, а також проведено аналіз робіт, присвячених визначенню динамічних зусиль, які з'являються при роботі механізму повороту. Проведений аналіз теоретичних досліджень динаміки та оптимізації режимів руху механізму повороту стрілового крана показав, що для мінімізації динамічних навантажень в системі використовуються конструктивні удосконалення та штучні режими руху привода.

На основі цих досліджень були встановлені заходи, які направлені на зменшення динамічних навантажень у елементах механізму поворота і визначені головні задачі дослідження:

- проаналізувати результати досліджень стрілових кранів у напрямку зниження динамічних навантажень та усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі;
- провести динамічний аналіз реальних режимів руху механізму повороту стрілового крана;
- оптимізувати процес пуску механізму повороту стрілового крану;
- побудувати фізичну модель стрілового крана та експериментально в лабораторних умовах дослідити режими руху механізму повороту стріли крана під час перехідних процесів;
- розробити методику проведення експериментальних досліджень для підтвердження результатів теоретичних досліджень;
- розробити рекомендації щодо створення системи керування приводом механізму повороту стрілового крана і визначити її ефективність.

У **другому розділі** побудовано тримасову динамічну модель механізму повороту стрілового крана і розроблено для неї за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду математичну модель. За допомогою програмного забезпечення «Wolfram Mathematica» розв'язано систему диференціальних рівнянь руху

механізму повороту крана, в результаті чого отримані графічні залежності, які показали, що динамічні зусилля в пружному елементі в 4,3 рази перевищують номінальні навантаження, а максимальне значення рушійного моменту у 2,9 разів перевищує усталене значення.

Було встановлено, що пікові значення навантажень зароджуються на початку руху, тобто в період пуску системи механізму повороту стрілового крана. Обґрунтована концепція динамічного аналізу механізму повороту кранів на гнучкому підвісі та модель для аналізу коливань канатів вантажопідйомних кранів при підйомі вантажу «з підхватом». Отримані основні рівняння руху вантажу у неінерціальній системі відліку, пов'язаній з механізмом повороту крана.

Проведений динамічний аналіз показав, що необхідна мінімізація чинників, які діють на механізм повороту та призводять до динамічних навантажень, для зменшення яких виникає потреба в оптимізації режиму повороту крана, що дозволить зменшити навантаження у елементах приводу і конструкції.

У третьому розділі обґрунтовано динамічні моделі функціонування механізму повороту вантажопідйомного крана як механічної системи із зосередженими масами для оптимізації режимів пуску і гальмування та встановлено закони руху механізму повороту, які забезпечують оптимальне значення динамічного моменту. На основі тримасової динамічної моделі механізму повороту стрілового крана проведена оптимізація перехідних режимів руху за критерієм середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі, яка дозволила забезпечити плавний рух механізму повороту та зменшення динамічних навантажень в приводі та елементах конструкції крана.

Проведена оптимізація режиму руху в процесі пуску за інтегральним динамічним критерієм у вигляді середньоквадратичного значення пришвидшення зміни пружного моменту в приводному механізмі дозволила усунути коливання в елементах приводу та вантажу на гнучкому підвісі. Знайдені оптимальні режими повороту стрілового крана було рекомендовано

реалізувати за допомогою мехатронної системи керування приводним електродвигуном.

У четвертому розділі розроблена програма і методика проведення експериментальних досліджень. Для дослідження було вибрано реальний кран QTZ-80, який відрізнявся від лабораторної установки механізму повороту стрілового крана конструктивними, силовими та енергетичними параметрами і тому в експериментальних дослідженнях було використане фізичне моделювання, яке змінює масштаб і залишає фізичну природу явищ.

За допомогою теорії подібності була створена фізична модель механізму повороту стрілового крана, підібране необхідне вимірювально-реєструюче обладнання, що дозволило зафіксувати швидкість поворотної частини крана, прискорення стріли в її нижній та верхній частинах та кутове відхилення гнучкого підвісу з вантажем від вертикалі. За допомогою критеріїв подібності визначені числові значення коефіцієнтів подібності реального механізму повороту стрілового крана і його фізичної моделі.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено програму роботи механізму повороту стрілового крана при ручному (на природній механічній характеристиці двигуна) та при оптимальних режимах керування.

Було розроблено програму реалізації оптимальних режимів руху «Optimal control of the jib crane turning mechanism» за рахунок керування перетворювачем частоти та приводом механізму повороту стрілового крана.

У п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень роботи механізму повороту стрілового крана та розрахунок економічної ефективності його впровадження.

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що оптимальне керування рухом механізму повороту в порівнянні з ручним дає змогу зменшити пікові значення кутової швидкості поворотної частини стрілового крана під час роботи механізму повороту. Максимальне відхилення гнучкого підвісу з вантажем під час перехідних процесів пуску та гільмування оптимальне керування дає можливість зменшити на 50% в порівнянні з ручним керуванням.

Проведено порівняння результатів досліджень, розрахованих теоретичним шляхом за допомогою розроблених моделей, з експериментальними, отриманими на фізичній моделі стрілової системи, відхилення не перевищували 14%. Розроблені рекомендації дозволяють реалізувати знайдені оптимальні режими повороту стрілового крана за допомогою розробленої мехатронної системи керування приводним електродвигуном.

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, які отримані з датчиків, необхідних для підстановки у синтезований закон, який описує швидкість приводу під час повороту крана за оптимальним режимом.

Економічна ефективність від впровадження розробленої системи керування приводом механізму повороту стрілового крана включає зменшення витрат електроенергії в приводному двигуні механізму повороту, що дає можливість отримати зменшення енерговитрат на 21,7% на один кран і становить 160025грн/рік. Економічна ефективність за рахунок зменшення тривалості робочого циклу становить 178810грн/рік в порівнянні з існуючою системою керування.

Зауваження що до змісту дисертації:

1. У першому розділі надано дуже поширену довідникову інформацію про конструкцію стрілових кранів. Але було б доцільно при розгляді різних схем механізмів повороту оцінити їх переваги з точки зору динамічних навантажень.
2. Необхідно було навести більш повне обґрунтування динамічної моделі механізму повороту та вибору критеріїв оптимізації режимів руху механізму повороту.

3. Незрозуміло чому рушійний момент приводу визначався зі статичної механічної характеристики (формула Клосса)?
4. В математичній моделі в формулі (2.1) присутній момент сил опору M_1 , але числове значення цього моменту у вихідних даних для розрахунку моделі відсутнє.
5. В п. 2.5 «Використання розв'язків «кембріджських задач » у аналізі коливань канатів вантажопідйомних кранів» матеріал не зовсім відповідає темі дисертації, тому його доцільно було б об'єднати з п. 2.4 «Концептуальні основи динамічного аналізу механізму повороту кранів з вантажем на гнучкому підвісі».
6. Автором проведено розрахунок економічної ефективності тільки від зменшення витрат енергії, але ж в роботі вирішувались питання не тільки зменшення енергії, але і підвищення продуктивності за рахунок зменшення тривалості циклу руху та підвищення надійності крана за рахунок зменшення динамічних навантажень, тому треба було розрахувати ефективність і від цих складових.
7. У висновках треба було при розгляданні підвищення ефективності роботи механізму повороту і крана в цілому більше уваги приділити науковим результатам, отриманим автором.
8. Необхідно було б дати більш повне пояснення до фазових портретів наведених на рис.3.15, 3.25, 3.30 та 3.34.
9. В роботі розроблено комп'ютерну програму оптимального керування приводом механізму повороту, але не вказано, які саме режими руху можуть бути реалізовані за допомогою цієї програми?
10. На рис.3.15 б) не всі величини читаються на фазовому портреті.
11. Впровадження результатів дисертаційної роботи проведено тільки в навчальному процесі, було б доцільним зробити це і для промисловості.
12. В тексті дисертації присутні деякі помилки і неточності на стор.3, 7, 41, 54, 64, 65, 75, 78, 84, 85, 86, 87, 90. 91, 92, 116.

Слід зазначити що наведені зауваження не носять принципового характеру і суттєво не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Кадила І.О.

ВИСНОВОК

1. Дисертація є завершеною науково-дослідною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують актуальну задачу підвищення ефективності роботи механізмів повороту стрілових кранів.

2. Цей результат є суттєвим внеском у розробку сучасних конструкцій вантажопідійомних кранів на підприємствах України.

3. Автореферат достатньо повно розкриває зміст, результати та висновки дисертаційної роботи, ступінь новизни і практичне значення результатів досліджень, а також особистий внесок автора.

4. Зміст дисертації й автореферату в достатній мірі відображено в опублікованих матеріалах досліджень (статтях, патентах та тезах доповідей).

5. Недоліки, зазначені у зауваженнях, не мають суттєвого впливу на загальну цінність дисертаційного дослідження і носять дискусійний характер.

6. Дисертаційна робота «Оптимізація перехідних режимів руху механізму повороту стрілового крана» за актуальністю, структурою, обсягом, змістом, якістю оформлення та викладення матеріалу відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, паспорту спеціальності 05.05.05 – піднімально-транспортні машини і достатньо апробована на наукових конференціях, семінарах, а основні положення відкрито висвітлені у наукових фахових виданнях.

Надані зауваження носять дискусійний характер і не принципові.

Дисертаційна робота Кадикала Івана Олександровича на тему «Оптимізація перехідних режимів руху механізму повороту стрілового крана» являє собою завершену наукову працю і за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом і оформленням відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами та доповненнями), які

пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.05 – піднімально-транспортні машини.

На підставі цього вважаю, що автор дисертації Кадикало Іван Олександрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.05 – піднімально-транспортні машини.

Офіційний опонент, доктор технічних наук,
професор, професор кафедри будівельних і
дорожніх машин Харківського національного
автомобільно-дорожнього університету

09.04.2021 року

