

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Кадикало Івана Олександровича** за темою «**Оптимізація перехідних режимів руху механізму повороту стрілового крана**», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.05 – піднімально-транспортні машини

1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами

Зниження динамічних навантажень на елементи підіймально-транспортних машин є однією з важливих науково-практичних задач забезпечення надійності та довговічності. Механізм повороту є невід'ємною складовою стрілового, баштового, порталного та інших подібних консольних кранів. Поворотна частина будь-якого стрілового крана має значну рухому масу та момент інерції, тому в процесі роботи механізму повороту в елементах приводу внаслідок недосконалості конструкції, під час перехідних режимів пуску та гальмування виникатимуть значні динамічні навантаження, що обмежує підвищення швидкості руху даним механізмом, а отже і продуктивності крана. Динаміка руху механізму повороту стрілового крана впливає на коливання вантажу на гнучкому підвісі та надійність елементів крана. Значні динамічні навантаження спричиняють збільшенню розгойдування незрівноважених рухомих мас, зокрема вантажу, зменшенню стійкості крана та навантаження його металоконструкції додатковими пульсуючими зусиллями.

Одним зі шляхів зниження динамічних навантажень в елементах приводу механізму повороту крана є застосування оптимального керування, яке дозволяє за рахунок зовнішнього силового впливу з боку привідного механізму, враховуючи особливості машини і технологій її роботи, формувати режими руху з бажаними якісними характеристиками. Для визначення параметрів керування привідним механізмом застосовують методи оптимізації за якими розраховують характеристики керуючого впливу з мінімізацією не бажаних властивості процесу або машини.

Існуючі дослідження в даному напрямі не в повній мірі вирішують задачу пошуку оптимальних законів руху систем повороту крана з гнучким підвісом вантажу, зокрема не якісно досліджено вплив параметрів привідного механізму на динаміку процесу повороту. Отож зазначена тема дисертації за даним напрямом є актуальною науково-прикладною задачею.

Актуальність теми дисертації підтверджується зв'язком з науково-дослідною тематикою кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України при виконанні держбюджетних тем “Наукове обґрунтування і розробка методів динамічного моделювання та режимно-параметричної оптимізації сучасних вантажопідйомних машин” (номер держреєстрації №0119U100848) та “Динамічна оптимізація вантажопідйомних та транспортуючих машин в агропромисловому виробництві” (номер держреєстрації № 0118U004170).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Детальне ознайомлення з дисертаційною роботою дає підстави стверджувати про обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, які ґрунтуються на використанні апробованих методів наукових досліджень: теоретичної механіки, теорії машин та механізмів, математичного моделювання, диференціального, інтегрального та варіаційного числення, теорії автоматичного керування. В роботі правильно та переконливо поставлені завдання дослідження, виконання яких забезпечило досягнення поставленої мети.

В результаті дослідження побудовано динамічну та математичну моделі механізму повороту стрілового крана з гнучким підвісом вантажу на жорсткому канатні, вибрано метод оптимізації та критерії оптимізації, визначено раціональні режими механізму повороту в процесі переміщення вантажу та параметри системи керування, які реалізують бажані закони руху.

Для підтвердження адекватності отриманих теоретичних гіпотез для різних режимів керування, проведено експериментальні дослідження. Всі основні результати експериментів зафіксовано і проведено їх порівняльний аналіз з теоретичними даними. Встановлена розбіжність між теорією і

експериментом знаходиться в допустимих межах.

Всі висновки зроблені в кінці кожного з розділів і дисертації в цілому підтверджуються змістом розділів.

Автореферат в повній мірі відображає основний зміст дисертації. Наукові положення, результати і висновки в авторефераті і дисертації ідентичні.

3. Наукова новизна та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

В дисертації представлено побудовану математичну модель динаміки руху поворотної частини стрілового крана, яка враховує механізми впливу масово-інерційних характеристик і геометричних параметрів механічної системи повороту крана з вантажем та жорсткості приводу на динаміку зміни кінематичних і силових параметрів розглядуваної системи.

Встановлено, що для зменшення коливань в системі повороту стрілового крана необхідно оптимізувати режими його руху за одиничними інтегральними критеріями з підінтегральними функціями, які відображають зміну динамічного моменту системи, приведеного до осі пружних коливань привідного механізму і залежить від вищих похідних координати кута відхилення вантажу.

В роботі враховані особливості роботи механізму повороту крана при переміщення вантажу на гнучкому підвісі та без гнучкого підвісу, зокрема розроблено безрозмірний комплексний інтегральний динамічний критерій оцінки режиму повороту стрілового крана, який включає дію динамічних навантажень і швидкість їхньої зміни в часі.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій ґрунтується на послідовних та системних теоретичних дослідженнях із застосування теорії подібності з експериментальним підтвердженням отриманих результатів. Експерименти були проведені на натурній моделі стрілового крана в лабораторних умовах на кафедрі конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України з дотриманням правил організації і проведення багатofакторних експериментів. Збір даних здійснювався за допомогою сертифікованого

обладнання m-DAQ, а їх обробка виконувалася в пакетах прикладної програми Mathematica. Достовірність отриманих результатів підтверджена достатнім збігом аналітичних та експериментальних даних.

4. Загальна характеристика структури і змісту дисертаційної роботи

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основна частина роботи складає 263 сторінки, на 24 сторінках наведено список використаних джерел, на 30 сторінках викладено додатки. Текст містить 17 таблиць та 93 рисунки. До списку використаних джерел увійшло 242 найменування.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну дисертаційного дослідження, її практичну значимість та зв'язок із науковими темами.

У **першому розділі** наведено особливості конструкції та роботи механізмів повороту кранів консольного типу, зокрема баштових і стрілових. Проаналізовано дослідження в області динаміки стрілових кранів та розглянуто роботи з усунення коливань вантажу при їх переміщенні стріловими кранами. Аналіз вказаних напрямків наукових пошуків дав змогу сформулювати завдання дисертаційного дослідження.

Другий розділ присвячено побудові динамічної моделі механізму повороту стрілового крана з трьома ступенями вільності та виведення на її основі із застосуванням рівнянь Лагранжа 2-го роду математичної моделі. Динамічна модель представлена у вигляді трьох зосереджених рухомих мас системи, дві з яких – привідний двигун та поворотна частина крана з'єднані між собою пружним зв'язком, що забезпечує їх взаємне переміщення. Коливання вантажу враховується шляхом введення додаткової кутової координати, яка характеризує відхилення жорсткого підвісу (каната) вантажу від вертикалі. На отриманій математичній моделі проведено теоретичне моделювання процесу повороту крана та надано аналіз отриманих результатів згідно з яким встановлено проблему появи коливань вантажу та елементів приводу.

Окрему увагу в даному розділі приділено динамічному аналізу

механізму повороту крана з вантажем на гнучкому підвісі, зокрема механізму дії сил у відносному переміщенні вантажу, а також розглянуті деякі аспекти коливань канатів.

В **третьому розділі** проведено вибір методу та критеріїв оптимізації перехідних режимів руху механізму повороту стрілового крана, де у якості основного критерію застосовано рівняння динамічного моменту зведеного до пружної ланки приводу. На першому етапі оптимізації, досліджено роботу системи без гнучкого підвісу і вантажу, тим самим було визначено характер зміни привідного моменту та оцінено механізми формування нерівномірності руху при передачі обертання від двигуна до рухомої частини крана, а саме було знайдено рівняння зміни динамічного моменту для різних співвідношень тривалості перехідного процесу і коефіцієнта в'язкого тертя системи. Наступні етапи оптимізації проведено з урахуванням коливань вантажу при повороті поворотної частини крана. В якості критеріїв оптимізації досліджено мінімізацію середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі та швидкостей його зміни, а також представлені результати комплексної оптимізації з безрозмірним інтегральним динамічним критерієм за даними показниками.

При розв'язку задач оптимізації використано загальновідомі варіаційні методи та евристичний алгоритм – «метод бджолиного рою».

Отримані залежності дозволили встановити закономірності режимів руху за якими значно знижуються динамічні навантаження в елементах приводу поворотної частини стрілового крана.

В **четвертому розділі** дисертації наведено методику планування і проведення експериментальних досліджень, проведено розрахунок параметрів фізичної моделі для експериментів, підібрано вимірювальне обладнання та подано механізм впровадження програмного керування приводом крана. Дослідження проводились в лабораторних умовах.

У **п'ятому розділі** представлено результати експериментальних досліджень динаміки руху системи повороту стрілового крана. Для аналізу експериментальних даних застосовано програмний продукт Mathematica. Окрім цього в даному розділі представлено схему системи програмного

керування крана на базі частотного перетворювача з програмованим одно-
платним комп'ютером і подано алгоритм керування, який дозволяє
реалізовувати оптимізовані режими руху. Використання подібного підходу
для реалізації підвищення ефективності роботи крана дозволяє застосовувати
подібне рішення не лише на нових зразках техніки, але й в існуючих з
мінімальними витратами на реалізацію.

Також в даному розділі виконано економічний розрахунок, який
дозволяє оцінити ефективність впровадження даного рішення у виробництво.

Загальні висновки по роботі відповідають результатам теоретичних і
експериментальних досліджень, що дає змогу підвищити надійність кранових
елементів та знизити коливання вантажу із забезпеченням ефективності
роботи приводу механізму повороту стрілового крана.

Зміст **автореферату** відповідає основним положенням дисертації.

5. Зауваження до розділів та дослідження у цілому

До першого розділу:

1. Оглядова частина переобтяжена непотрібною інформацією про крани
та загальновідомими фактами. Значна частина уваги приділена
конструктивним рішенням механізмів повороту крана, проте в подальшому
ця інформація ніяким чином не використовуватиметься в ході проведення
наукових досліджень, а вплив різної конструктивної особливості схем
механізму повороту не оцінюється в розрізі оптимальних режимів руху.

До другого розділу:

1. В розробленій динамічній моделі механізму повороту крана показано
дію рушійного моменту M_0 на валу електродвигуна, який в математичній
моделі виражено через критичний момент двигуна $M_{кр}$ і передаточну
функцію приведення до осі повороту крана, а також враховано дію
статичного моменту опору M_1 , що також зведено до осі повороту крана. В
подальшому, при дослідженні динаміки механізму повороту згадується про
дію пружного моменту в пружному елементі, зокрема в авторефераті та
дисертації зазначено «..максимальні динамічні зусилля в пружному елементі
в 4,3 рази перевищують номінальні...», а на рис. 2.5 показано графік зміни
пружного моменту, проте на динамічній моделі такий момент не

відображено, а в роботі необхідно було більш критично проаналізувати механізми його дії. Також цікаво який пружний елемент може сприймати такі навантаження і як було визначено його коефіцієнт пружності?

2. При нерівномірному обертанні крана з вантажем, що спостерігається в перехідних режимах руху, прискорення вантажу має складну залежність, яка міститиме нормальну і тангенціальну складову. Таким чином в зазначені періоди руху відхилення канату від вертикалі повинно бути в різних площинах, а на розрахунковій моделі прийнято відхилення лише в одній площині. Як це обґрунтовується?

До третього розділу:

1. На стр. 105 подано фразу «биття моменту». Бажано було пояснити це явище і механізми його виникнення.

2. У формулі (3.30) представлено інтегральний критерій оптимізації у вигляді квадрату пружного моменту, а у формулі (3.54) середньоквадратичне значення пружного моменту. Як корелюються отримані результати за цими критеріями?

До четвертого розділу:

1. Розділ перенасичений загальновідомою термінологією, а дані про тарування обладнання при цьому не вказані і в табл. 4.3 та 4.4 бажано було б подати кодування факторів експерименту за часом, масою, довжиною каната, а не перераховувати порядок дослідів.

До п'ятого розділу:

1. При порівнянні експериментальних даних з теоретичними корисно було б представити критерії достовірності і повторюваності.

Загальні зауваження до дисертаційного дослідження:

1. Доцільно б було показати характер впливу жорсткості пружної ланки розглядуваної системи та довжини підвісу вантажу на зміну динаміки крана і коливання вантажу, зокрема побудована математична модель дозволяє це робити.

2. Так як в роботі зміна довжини підвісного канату не досліджується, ефективніше було б провести двофакторний експеримент для різних мас і

часу перехідного процесу та відобразити вплив зміни цих факторів на динаміку роботи системи.

3. В розробленій динамічній та математичних моделях не враховується дія зовнішнього середовища в якому може працювати кран в реальних умовах, наприклад дія пульсуючого вітрового навантаження. Як такі умови відобразяться на динаміці механізму повороту крана?

6. Повнота викладу основних результатів дисертації у наукових фахових виданнях

Основні положення та результати дисертаційних досліджень опубліковано у 32 наукових працях, з яких 8 статей у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у закордонних наукових виданнях, 19 тез доповідей на наукових конференціях, 2 патенти України на корисні моделі та три розділи колективної монографії. Результати дисертаційного дослідження доповідались на науково-практичних міжнародних та регіональних конференціях.

7. Загальні висновки

1. Дисертаційна робота Кадикало Івана Олександровича є актуальною, завершеною науковою роботою, в якій знайшла своє вирішення задача підвищення ефективності роботи стрілового крана за рахунок оптимізації режимів руху механізму повороту стріли.

2. Отримані у дисертаційному дослідженні результати мають теоретичне і практичне значення та можуть бути використані для удосконалення систем керування кранів, а дисертаційна робота загалом є завершеною науковою працею і за науковим рівнем, змістом та 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.

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.

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,
доцент кафедри будівельних машин
Київського національного університету
будівництва і архітектури,
кандидат технічних наук, доцент



Д.О. Міщук

Підпис Д.О. Міщука підтверджую,
вчений секретар Київського національного
університету будівництва і архітектури



О.С. Петренко