

УДК 621.873.11

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РУХУ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ ВАНТАЖУ
БАШТОВОГО КРАНА З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ СТІЛОЮ**

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

*Національний університет біоресурсів і природокористування України***Інформація про авторів:**

Ловейкін Вячеслав Сергійович: ORCID: 0000-0003-4259-3900; lovvs@ukr.net; доктор технічних наук; завідувач кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

Ромасевич Юрій Олександрович: ORCID: 0000-0001-5069-5929; romasevichyuriy@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

Стехно Олексій Володимирович: ORCID: 0000-0002-7285-6508; alexeystekhno1992@ukr.net; аспірант кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

Виконано режимну оптимізацію механізму зміни вильоту вантажу баштового крана з горизонтальною балочною стрілою, яка дозволяє збільшити продуктивність та підвищити надійність досліджуваного механізму.

У якості оптимізаційного критерію обрано інтегральний функціонал, який відображає середньоквадратичне значення швидкості зміни зусилля в тяговому канаті. Знайдено умову мінімуму вищевказаного критерію – рівняння Ейлера-Пуассона.

Розв'язок рівняння Ейлера-Пуассона з відповідними крайовими умовами дозволив зменшити небажані динамічні навантаження та енергетичні втрати у механізмі зміни вильоту вантажу баштового крана. Крім того, для знайденого оптимального режиму руху визначено час розгону механізму, при якому спостерігається відсутність реверсування асинхронного електродвигуна.

Отримані результати доцільно використовувати як при модернізації існуючих так і при розробці нових систем керування механізмом зміни вильоту вантажу баштового крана.

Ключові слова: кран; механізм; вантаж; динамічні навантаження; оптимізація.

Ловейкин В. С., Ромасевич Ю. А., Стехно А. В. «Оптимизация режима движения механизма изменения вылета груза башенного крана с горизонтальной стрелой».

Выполнено режимную оптимизацию механизма изменения вылета груза башенного крана с горизонтальной стрелой, которая позволяет увеличить производительность и повысить надежность исследуемого механизма.

В качестве оптимизационного критерия выбран интегральный функционал, который отражает среднеквадратическое значение скорости изменения усилия в тяговом канате. Найдено условие минимума вышеуказанного критерия – уравнение Эйлера-Пуассона.

Решение уравнения Эйлера-Пуассона с соответствующими краевыми условиями позволило уменьшить нежелательные динамические нагрузки и энергетические потери в механизме изменения вылета груза башенного крана. Кроме того, для найденного оптимального режима движения определено время разгона механизма, при котором наблюдается отсутствие реверсирования асинхронного электродвигателя.

Піднімально-транспортні машини

Полученные результаты целесообразно использовать как при модернизации существующих, так и при разработке новых систем управления механизмом изменения вылета груза башенного крана.

Ключевые слова: кран; механизм; груз; динамические нагрузки; оптимизация.

Loveikin V., Romasevych Y., Stekhno O.V. “Regime optimization of a horizontal gibbet radius varying mechanism of a tower crane”.

A regime optimization of the mechanism of horizontal gibbet radius varying mechanism of a tower crane has been implemented. It allows to increase the productivity and the reliability of the researched mechanism.

An integral functional has been chosen as an optimization criterion. It reflects the mean square value of the change rate in the pulling rope. A minimum condition of the above criterion has been found – the Euler-Poisson equation.

The solution of the Euler-Poisson equation with the corresponding boundary conditions has allowed to reduce undesirable dynamic loads and energy losses in the mechanism. Moreover, for the obtained optimal regime of the movement the acceleration duration has been determined. It allows to avoid the reverse of the asynchronous electric motor.

The obtained results should be used both during the modernization of the existing and in the development of new control systems of horizontal gibbet radius varying mechanism of a tower crane.

Key words: crane; mechanism; cargo; dynamic loads; optimization.

1. Постановка проблеми

В умовах стрімкого розвитку міст та селищ міського типу значного поширення набули баштові крани з горизонтальною стрілою, які використовуються для зведення будівельних споруд різного типу і складності.

Одним із основних механізмів баштового крана є механізм зміни вильоту вантажу, який дозволяє переміщувати візок з вантажем, що закріплений на гнучкому підвісі, вздовж напрямних по балочній стрілі.

На сьогоднішній день значна кількість кранових механізмів, в тому числі й механізм зміни вильоту вантажу, є технічно та морально застарілими, ресурс більшості з них вичерпаний. Інтенсивна експлуатація механізму зміни вильоту вантажу в такому технічному стані призводить до виходу його з ладу, що викликає зупинку баштового крана.

З іншого боку забезпечення високої продуктивності при роботі механізму зміни вильоту призводить до значних коливань вантажу закріпленого на гнучкому підвісі, що супроводжується значними динамічними навантаженнями в його елементах. Динамічні навантаження суттєво зменшують продуктивність та знижують надійність роботи механізму зміни вильоту вантажу, піддають ризику роботу стропальників та кранівника, вимагаючи від нього постійно бути в напруженому стані, а також інших робітників, котрі працюють на будівництві.

Зменшити динамічні навантаження та збільшити продуктивність механізму зміни вильоту вантажу баштового крана можливо за рахунок оптимізації режиму його руху із подальшим визначенням раціонального часу розгону кранового механізму.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням зменшення коливань вантажу на гнучкому підвісі та зниженню динамічних навантажень у механізмах вантажопідіймальних машин займалися багато дослідників.

Одним з найпростіших способів усунення коливань вантажу є використання спеціальних підвісок конструкції яких запропоновані в роботах [1-4]. Такі конструктивні зміни вимагають значних капіталовкладень. Також вони додатково навантажують кран, що є небажаним, а усунення коливань вантажу вимагає відносно тривалого часу.

Метод моментів дозволив дослідникам у роботах [5, 6] знайти оптимальні закони руху крана, при яких коливання вантажу на гнучкому підвісі усуваються.

Один зі способів усунення коливань вантажу описаний у роботі [7]. Він полягає в короткочасному вмиканні та вимиканні електродвигуна приводу візка у визначені моменти часу.

Що стосується баштових кранів стрілового типу, то в цьому напрямку можна виділити роботи [8, 9], в яких отримала розвиток нейро-нечітка система керування робочими рухами крана. Така система дозволяє моделювати поведінку оператора крана, тому її можна називати інтелектуальною.

В роботі [10] запропоновано закріплювати додаткову масу на гнучкий підвіс. Це дозволяє зменшити період коливань вантажу, що зменшує тривалість затухання коливань, однак це суперечить вимозі максимальної швидкодії крана.

В праці [11] на основі класичного варіаційного підходу поставлені та розв'язані оптимізаційні задачі керування рухом кранових механізмів при підйому вантажу та зміні його вильоту. Подальший розв'язок отримала методика синтезу оптимальних законів руху, за якими коливання вантажу при роботі механізму усуваються до кінця перехідного процесу.

В роботі [12] оптимізовано перехідні режими руху шарнірно-зчленованої стрілової системи та вантажного візка за кінематичними, динамічними та енергетичними критеріями, розраховано сукупний економічний ефект, який пов'язаний зі зменшенням динамічних навантажень в приводних механізмах та скороченням часу перевантажувальних операцій за рахунок усунення залишкових коливань вантажу в момент закінчення руху, розроблено систему керування приводними механізмами для реалізації оптимальних законів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи баштового крана.

3. Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності роботи баштових кранів із горизонтальною балочною стрілою за рахунок оптимізації режиму зміни вильоту вантажу та визначення його раціонального часу розгону. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) виконати режимну оптимізацію механізму зміни вильоту вантажу баштового крана; 2) визначити раціональний час розгону механізму приводу вантажного візка, при якому відсутній реверс асинхронного електродвигуна.

4. Виклад основного матеріалу

Для визначення оптимального режиму руху механізму зміни вильоту вантажу баштового крана використана чотиримасова динамічна модель (рис. 1) в який за узагальнені координати прийняті: зведена кутова координата повороту ротора електродвигуна φ_0 , зведена кутова координата повороту канатного барабана механізму переміщення візка φ_1 , лінійні координати центрів мас візка x_1 , вантажу x_2 та приводного барабана x_3 .

типу. В якості оптимізаційного критерія обрано середньоквадратичне значення швидкості зміни зусилля в тяговому канаті, яке має наступний вигляд:

$$\dot{F}_{к.с.к} = \left[\int_0^{t_1} \ddot{F}_к^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де t_1 – відповідно час перехідного процесу механізму зміни вильоту вантажу; $F_к$ – зусилля в тяговому канаті. Підінтегральний вираз критерію (1) визначається наступним чином:

$$f = \dot{F}_к^2 = c_1^2 \cdot (\ddot{\phi}_1 \cdot R - \ddot{x}_1)^2. \quad (3)$$

Умовою мінімуму критерію (2) є рівняння Ейлера-Пуассона, яке представляється у такому вигляді:

$$x_{2}^{III} + 2 \cdot k^2 \cdot x_2 + k^4 \cdot x_2 = 0, \quad (4)$$

де k – частота власних маятникових коливань вантажу відносно точки його підвісу, яке визначається за наступною залежністю $k = \sqrt{(m_1 + m_2)/(m_1 \cdot l) \cdot g}$.

Рівняння (4) розв'язується за наступних крайових умов:

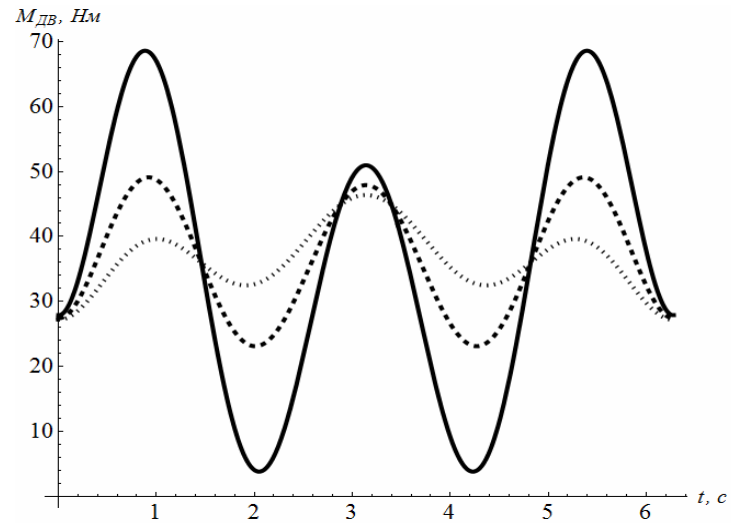
$$\begin{cases} x_2(0) = \dot{x}_2(0) = \ddot{x}_2(0) = \ddot{\ddot{x}}_2(0) = x_2^{IV}(0) = x_2^V(0) = 0; \\ x_2(t_1) = \frac{v \cdot t_1}{2}; \dot{x}_2(t_1) = v; \ddot{x}_2(t_1) = \ddot{\ddot{x}}_2(t_1) = x_2^{IV}(t_1) = x_2^V(t_1) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

В результаті розв'язку рівняння (4) за крайових умов (5), отримано вирази оптимальних законів руху зведених елементів системи (рис. 2) при довжині гнучкого підвісу, яка становить $l = 10, 20$ та 40 метрів, які зображені відповідними лініями.

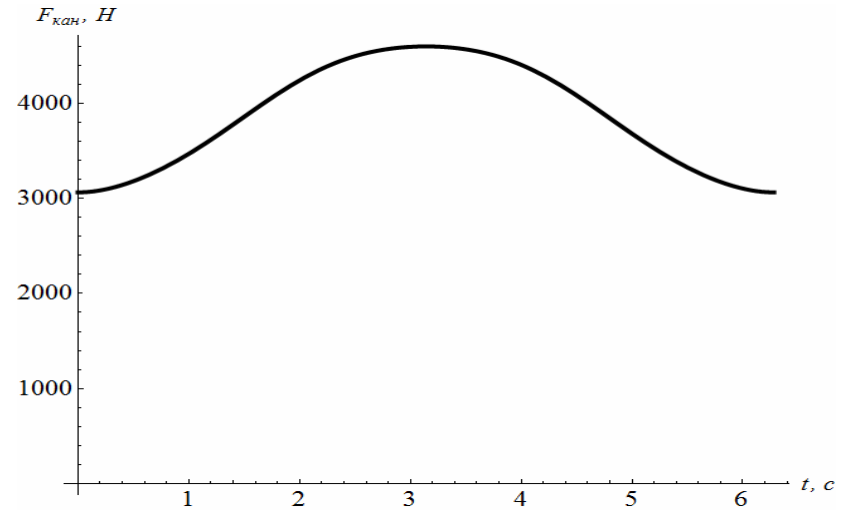
Дослідження динамічних, кінематичних та енергетичних характеристик, для отриманого оптимального режиму руху механізму зміни вильоту вантажу баштового крана відбувалося при різній довжині гнучкого підвісу.

Знайдений оптимальний закон руху механізму зміни вильоту вантажу баштового крана в порівнянні з некерованим режимом розгону крана (на природній механічній характеристиці двигуна) дозволяє знизити динамічні навантаження в досліджуваному механізмі, а саме: максимальний момент на валу двигуна в 4,84 рази (рис. 1 а), який суттєво зменшується при меншій довжині гнучкого підвісу. Значення максимальної потужності приводу зменшилося в 3,81 рази (рис. 1 б), а максимальне зусилля в тяговому канаті знизилося в 1,33 рази.

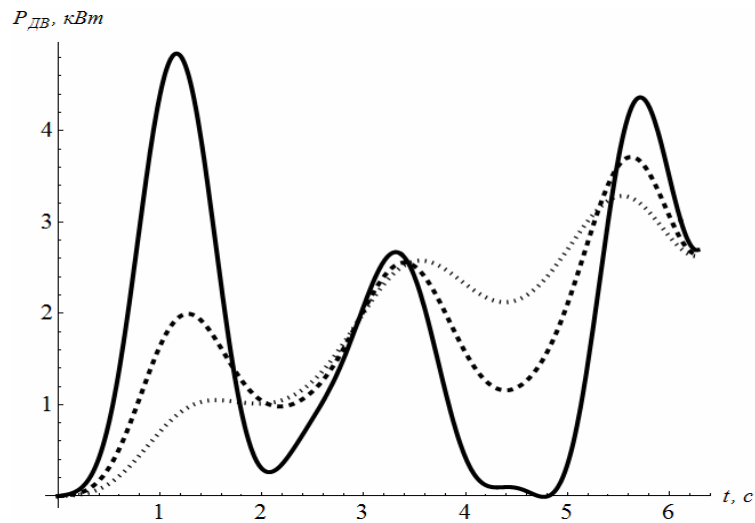
Спостерігається плавний вихід вантажного візка на усталену швидкість (рис. 2, з), що супроводжується зменшеним коливальним процесом при меншій довжині гнучкого підвісу. Фазовий портрет (рис. 1 д) показує, що фазова точка в кінці розгону повертається на те місце, з якого вона почала свій рух, тобто коливання вантажу на гнучкому підвісі усуваються. Максимальне відхилення вантажу від вертикалі в процесі пуску зменшилось на 1,63 рази. Використання меншої довжини гнучкого підвісу дозволяє зменшити динамічні навантаження в досліджуваному механізмі, також забезпечити більш плавний вихід механізму на усталену швидкість і, як наслідок, призводить до збільшення терміну його експлуатації та підвищення надійності.



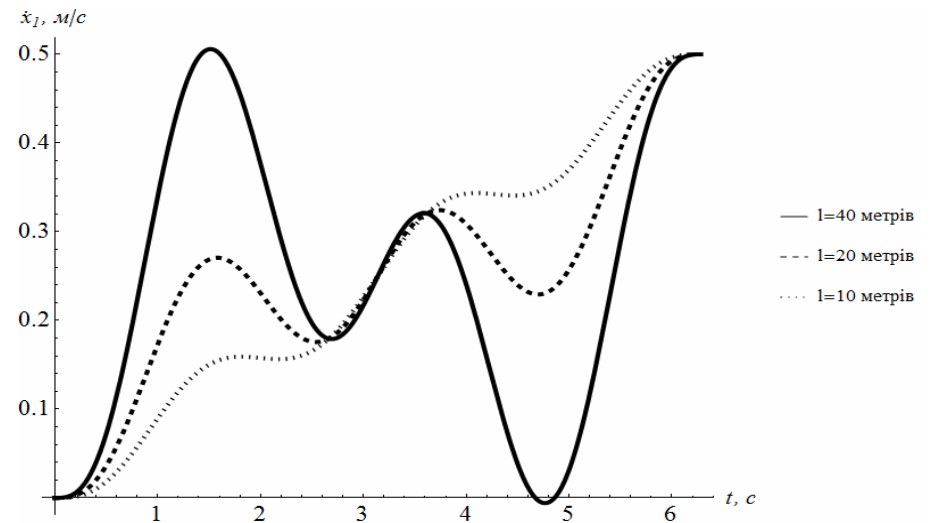
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. – Графіки функцій, що описують рух зміни вильоту вантажу за оптимальним законом:

(а) – момент на валу двигуна; (б) – потужність двигуна; (в) – зусилля в тяговому канаті (для $l=40$ м); (г) – лінійна швидкість вантажного візка

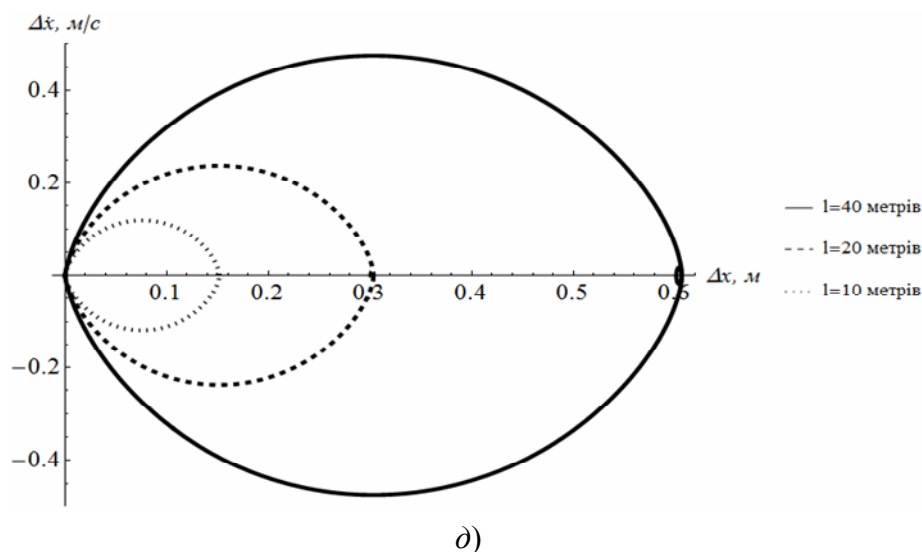


Рис. 2 (Продовження) – Графіки функцій, що описують рух зміни вильоту вантажу за оптимальним законом: (д) – фазова траєкторія коливань вантажу

Одним із визначальних параметрів механізму зміни вильоту вантажу, разом з довжиною гнучкого підвісу, є час розгону, при якому механізм виходить на усталену швидкість. В результаті мінімізації критерію (2) визначені режими розгону приводного механізму при різних тривалостях перехідного процесу (рис. 3). У ході проведення досліджень встановлено, що для знайденого в роботі оптимального закону руху системи при довжині гнучкого підвісу вантажу $l = 40$ метрів раціональний час розгону становить $t_l = 6,28$ с, оскільки це час, при якому відсутній реверсний рух приводного механізму.

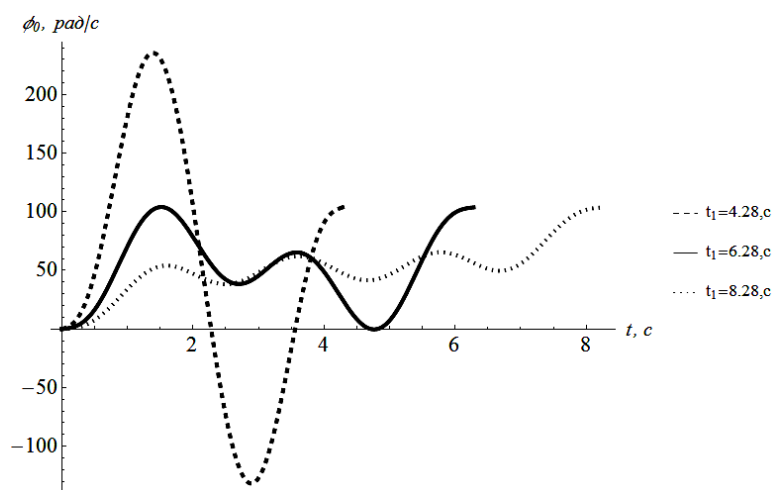


Рис. 3. – Графіки зміни кутової швидкості ротора приводного двигуна за оптимального керування при різній тривалості розгону механізму зміни вильоту вантажу баштового крана

Тривалість розгону, що є меншою за 6,28 с, призводить до перевищення кутовою швидкістю електродвигуна її номінального значення і до його реверсування електродвигуна. Даний фактор має негативний вплив на надійність роботи як самого електродвигуна, так і механізму зміни вильоту вантажу загалом. Тривалість розгону більше 6,28 с призводить до зменшення продуктивності роботи механізму зміни вильоту вантажу, оскільки при цьому збільшується загальна тривалість перехідного процесу.

Піднімально-транспортні машини**Висновки**

Знайдений оптимальний закон руху механізму зміни вильоту вантажу в порівнянні з законом руху на природній механічній характеристиці дозволяє знизити небажані динамічні та енергетичні показники, такі як: перевантаження двигуна за крутним моментом – у 4,85 рази; перевантаження двигуна за потужністю – в 3,86 рази; коефіцієнт динамічності тягового канату – у 1,5 рази; максимальне відхилення вантажу від вертикалі зменшилося – в 1,49 рази.

Список використаних джерел:

1. Сохадзе А. Г. Мехатронная система грузоподъемного крана для автоматической стабилизации положения груза и управления его движением : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.05 / Сохадзе Александр Георгиевич. – Новочеркасск, 2006. – 218 с.
2. Флюгель Ф. Методика построения обобщенных математических моделей грузоподъемных кранов с грузом на пространственном канатном подвесе : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.04 Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины / Флюгель Франк. – СПб., 2002. – 18 с.
3. Сахаров Э. О. Некоторые вопросы демпфирования колебаний груза на гибком подвесе / Э. О. Сахаров // Исследование динамики грузоподъемных кранов. – 1970. – № 5(100). – С. 30-39.
4. Алейнер А. Л. Моделирование системы ограничения раскачивания груза при работе механизма передвижения крановой тележки / А. Л. Алейнер, А. Н. Орлов // Подъемно-транспортные машины. – 1975. – № 4. – С.17-23.
5. Геронимус Я. Л. О некоторых методах определения оптимального закона движения, рассматриваемого как управляющее воздействие / Я. Л. Геронимус, М. М. Перельмутер // Машиноведение. – 1966. – № 6. – С. 6-24.
6. Перельмутер М. М. Устранение колебаний груза, подвешенного к крановой тележке, воздействием на его электропривод / М. М. Перельмутер, Л. Н. Поляков // Известия вузов. Электромеханика. – 1971. – № 7. – С. 46-51.
7. Keith A., Hekman. A feedback control system for suppressing crane oscillations with on-off motors / Keith A. Hekman, William E. Singhose // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2007. – № 3. – P. 223-233.
8. Денисов И. В. Моделирование системы программного управления рабочим процессом стрелового крана / И. В. Денисов, В. А. Мещеряков // Омский научный вестник. – 2009. – № 1(77). – С. 81-86.
9. Денисов И. В. Моделирование системы нечеткого управления рабочим процессом стрелового крана / И. В. Денисов, В. А. Мещеряков, В. С. Итякова // Омский научный вестник. – 2009. – № 3(83). – С. 123-126.
10. Голдобина Л. А. Теоретическое обоснование снижения раскачивания груза на канате строительного крана / Л. А. Голдобина, А. В. Власов, А. Л. Бочков // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2011. – № 16. – С. 52-60.
11. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму зміни вильоту і підйому вантажу баштового крана / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, Г. В. Шумілов. – Київ : ЦП „КОМПРИНТ”. 2013. – 174 с.
12. Шевчук О.Г. Оптимізація режиму зміни вильоту баштового крана з шарнірно-зчленованою стріловою системою : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.05 Піднімально-транспортні машини / Шевчук Олександр Григорович. – Київ, 2016. – 25 с.

References

1. Sokhadze, A 2006, 'Mekhatronnaia sistema gruzopodyemnogo kрана dlia avtomaticheskoi stabilizatsii polozheniia gruzа i upravleniia ego dvizheniem', Kand.tekhn.n. thesis, Iuzhno-Rossiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet (Novocherkasskmi politekhnicheskii institut), Novocherkassk.
2. Fliugel, F. 'Metodika postroyeniia obobshchennykh matematicheskikh modelei gruzopodyemnykh kranov s gruzom na prostranstvennom kanatnom podvese', Kand.tekhn.n. abstract, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, Sankt-Peterburg.
3. Sakharov, E 1970, 'Nekotoryye voprosy dempfirovaniia kolebanii gruzа na gibkom podvese', *Issledovaniye dinamiki gruzopodyemnykh kranov*, no. 5(100), pp. 30-39.
4. Aleiner, A 1975, 'Modelirovaniye sistemy ogranicheniia raskachivaniia gruzа pri rabote mekhanizma peredvizheniia kranovoi telezhki', *Podyemno-transportnyye mashiny*, no. 4, pp.17-23.
5. Geronimus, Ia & Perelmuter, M 1966, 'O nekotorykh metodakh opredeleniia optimalnogo zakona dvizheniia, rassmatrivayemogo kak upravliaiushcheye vozdeistviye', *Mashinovedeniye*, no. 6, pp. 6-24.
6. Perelmuter, M & Poliakov, L 1971, 'Ustraneniye kolebanii gruzа, podveshennogo k kranovoi telezhke, vozdeistviyem na yego elektroprivod', *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, no. 7, pp. 46-51.
7. Hekman, K & Singhose, W 2007, 'A feedback control system for suppressing crane oscillations with on-off motors', *International Journal of Control, Automation, and Systems*, no. 3, pp. 223-233.
8. Denisov, I & Meshcheriakov, V 2009, 'Modelirovaniye sistemy programmnogo upravleniia rabochim protsessom strelovogo kрана', *Omskii nauchnyi vestnik*, no. 1(77), pp. 81-86.
9. Denisov, I, Meshcheriakov, V & Itiaksova, V 2009, 'Modelirovaniye sistemy nechetkogo upravleniia rabochim protsessom strelovogo kрана', *Omskii nauchnyi vestnik*, no. 3(83), pp. 123-126.
10. Goldobina L, Vlasov, A & Bochkov, A 2011, 'Teoreticheskoye obosnovaniye snizheniia raskachivaniia gruzа na kanate stroitel'nogo kрана', *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa*, no. 16, pp. 52-60.
11. Loveikin, V, Romasevych, Yu & Shumilov, H 2013, *Optyimizatsiia rezhymu zminy vylotu i pidiomu vantazhu bashtovoho kрана*, Kyiv.
12. Shevchuk, O 2016, 'Optyimizatsiia rezhymu zminy vylotu bashtovoho kрана z sharnirno-zchlenovanoiu strilovoiu sistemoiu', Kand.tekhn.n. abstract, Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy, Kyiv.

Стаття надійшла до редакції 22 вересня 2017 р.