

## ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ І КОНТРОЛЮ ВАНТАЖУ СТІЛОВОГО САМОХІДНОГО КРАНА

©Подольак О.С., Староста Ж.С., Аненко К.К.

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### Інформація про авторів:

**Подольак Олег Степанович** ORCID: 0000-0002-1477-8548; [podoliak15os@gmail.com](mailto:podoliak15os@gmail.com); завідувач кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Староста Жанна Степанівна** ORCID: 0000-0002-6656-3602; [starostazanna@gmail.com](mailto:starostazanna@gmail.com); аспірантка кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Аненко Костянтин Костянтинович** ORCID: 0000-0002-3103-4786; [lolenkotcastiel@gmail.com](mailto:lolenkotcastiel@gmail.com); аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Стаття спрямована на пошук найбільш ефективного методу зменшення розгойдування стрілового самохідного крана при різних режимах роботи. Для цього було виконано огляд сучасної опублікованої літератури зарубіжних і українських видань та патентних досліджень.

Розглянуто класифікацію способів зменшення розгойдувань вантажу на гнучкому підвісі при роботі вантажопідійомних кранів. Наведені результати досліджень спрямовані на ефективне розв'язання питань коливання вантажу, що залежать від зовнішніх і внутрішніх впливів, таких як пориви вітру, швидкість і прискорення механізмів і т. д. Відзначено, що особлива увага приділяється управлінню зі зворотнім зв'язком, що може зменшити коливання корисного навантаження. Також звернуто увагу на проблему горизонтальних коливань, розв'язання якої є можливим з використанням закону контролю, заснованого на лінеаризованій моделі. Розглянуто математичну модель стрілового крана, що враховує всі ступені свободи, а також нелінійний закон управління, який використовує кожен стан моделі для керування крана в бік бажаного еталона. Також розглянуто гасіння сферичних коливань, яке відбувається за рахунок компенсувальних рухів стріли. Висвітлено винахід, принципом дії якого є гіроскопічний ефект. Розглянуто спосіб управління за допомогою приводів механізмів крана. Проаналізовано роботу контролера, у якому управління зі зворотнім зв'язком поєднується з формуванням вхідних сигналів. Також представлено структурну схему загальної системи управління цього контролера. Обраний оптимальний напрям контролю розгойдування вантажу на стрілі крана.

Встановлено, що в більшості розглянутих досліджень увага приділялася, переважно, проблемі розгойдування і контролю позиціонування на кранах мостового типу. Стрілові самохідні крани в цьому напрямку найменш досліджені об'єкти.

**Ключові слова:** стріловий кран; розгойдування вантажу; система зворотного зв'язку; позиціонування; управління коливаннями.

**Podoliak O., Starosta Zh., Anenko K.** "Review of the status of the issue of ensuring the positioning and control of the load of the self-propelled jib crane".

The article is aimed at finding the most effective method to reduce the swaying of a boom mobile crane under different modes of operation. For this purpose, a review of modern published literature of foreign and Ukrainian publications and patent studies has been performed.

The classification of methods of reducing the swaying of the cargo on the flexible suspension during the work of hoisting cranes has been reviewed. The results of research are aimed at an effective solution to the problem of cargo swaying, which depends on external and internal influences such as wind gusts, speed and acceleration of mechanisms, etc. It is noted that special attention is paid to control with feedback, which can reduce the oscillation of the payload. Attention is also drawn to the problem of horizontal oscillations, which can be solved by means of using the control law based on a linearized model. The mathematical model of the jib crane, taking into account all degrees of freedom, as well as a nonlinear control law that uses each state of the model to control the crane toward the desired benchmark is considered. The extinguishing of spherical oscillations, which occurs due to compensating movements of the boom, has been also considered. The invention of the gyroscopic effect is covered. The way of controlling with the help of crane mechanism drives has been reviewed. The operation of the controller in which feedback control is combined with the formation of input signals has been analyzed. A block diagram of the general control system of this controller has been also presented. The optimal direction of controlling the swing of the cargo on the boom of the crane has been chosen.

In the conclusions, it was found that most of the examined studies focus mainly on the problem of swaying and positioning control on overhead cranes. Boom mobile cranes are the least studied objects in this direction.

**Keywords:** jib crane; cargo swing; feedback system; positioning; oscillation control.

### **Актуальність**

Підйомні механізми з вантажозахоплювальним пристроєм на стрілі набули широкого розповсюдження і застосовуються при будівництві промислових об'єктів, торгових центрів, багатоповерхових будівель різного призначення. Оскільки стрілові крани є досить мобільними і мають хорошу вантажопідйомність їх можна використовувати у важкодоступних місцях. У сучасних умовах необхідні стрілові крани, які зможуть забезпечити точне позиціонування вантажу в задану точку з найменшим розгойдуванням.

Відомо, що розгойдування вантажу на стрілі крану є небезпечним та важкоусувним процесом. Через довготривалий процес вирівнювання вантажу темп робіт та продуктивність зменшується. Різноманітні способи зменшення коливань вантажу на вантажному підвісі стрілового крану можуть значно вплинути на підвищення продуктивності робіт, що виконуються, та забезпечити додаткову безпеку.

Колівання викликаються як навмисними рухами, керованими людиною - оператором, так і зовнішніми чинниками, що є основним обмеженням. Спроби оператора усунути проблему коливання вручну часто є важкими, особливо якщо кран демонструє нелінійну поведінку або в разі, коли оператор має обмежену видимість корисного навантаження. Так само канати вантажного підвісу мають властивість скручуватися і розкручуватися при коливаннях в різних площинах, а це в свою чергу призведе до передчасного зносу і навіть обриву.

Акцентуємо на потребі у системі управління, яка може ефективно контролювати розгойдування корисного навантаження під впливом команд оператора та зовнішніх чинників.

**Мета** - виконати огляд опублікованих джерел, наявних способів зменшення розгойдування вантажу і позиціонування вантажопідйомних кранів.

### Огляд стану питання

Велика кількість дослідників з різних країн [1, 2, 3, 4, 9] займалася питанням щодо зменшення розгойдування вантажу на гнучкому підвісі і зниження динамічних навантажень.

Так, у роботі [1] схематично розглянута класифікація способів зменшення розгойдувань вантажу на гнучкому підвісі.

Сутність роботи ж полягає в теоретичному дослідженні деяких шляхів зменшення розгойдування вантажу на просторовому канатному підвісі при роботі механізму повороту стрілових кранів і вплив схеми запасовки підйомних канатів на навантаження на кран від вантажу, що розгойдується на канатах[1].

Також у роботі [1] запропонована методика побудови штучних характеристик двигуна при контролерному керуванні, при яких виходять найменші відхилення центру ваги вантажу від положення рівноваги.

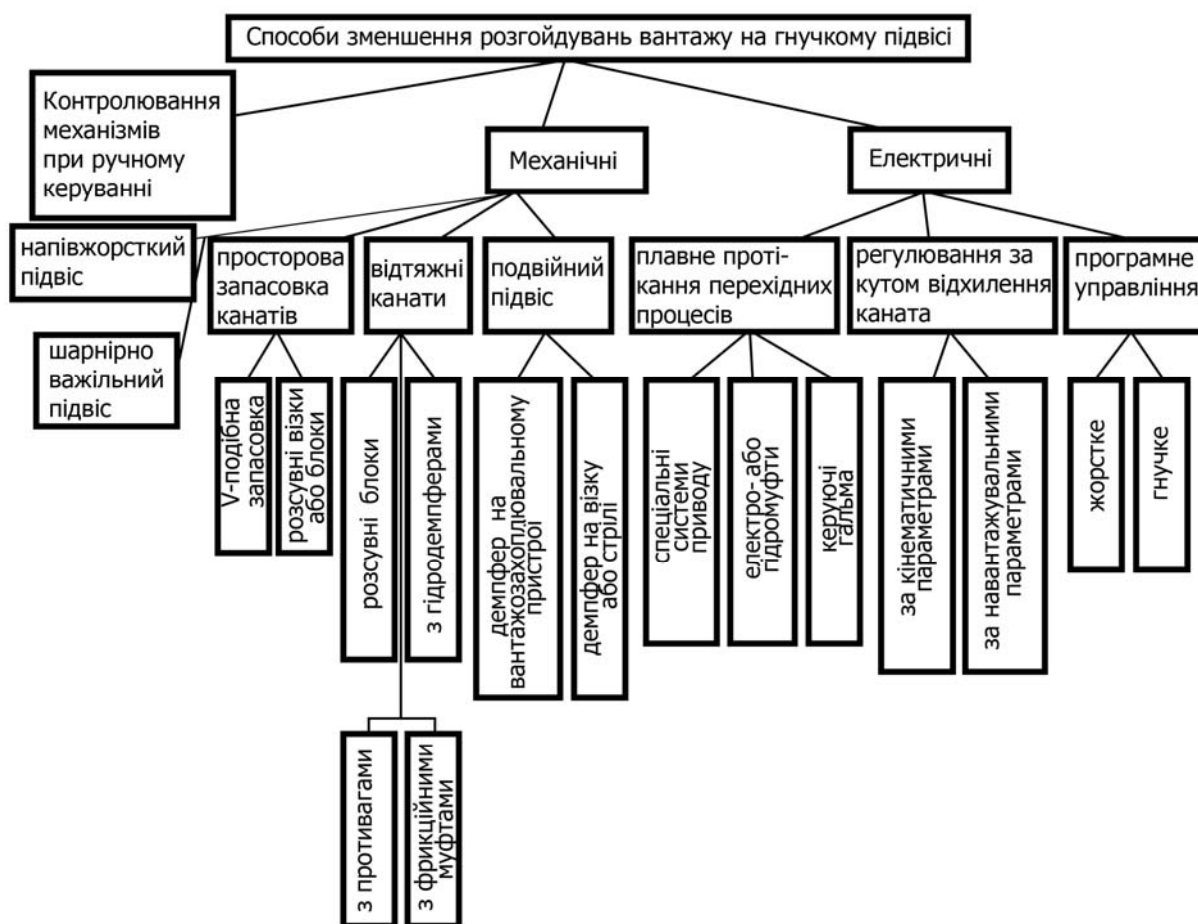


Рис.1 – Класифікація способів зменшення розгойдувань вантажу на гнучкому підвісі при роботі вантажопідйомних кранів

У роботі[1] визначено, що при коливаннях вантажу на підвісі за схемою I відбувається перерозподіл натягу в канатах і при відповідних умовах може відбутися ослаблення одного з них. Отримано формули для розрахунку навантажень на кран від розгойдуваного на канатах вантажу, які враховують схему підвісу вантажу і його інерційні характеристики. Показано, що ефективним засобом зменшення відхилення центру ваги вантажу від положення рівноваги може бути для схеми I рознесення канатів у верхніх точках. Розроблено програму

розрахунку на ЕОМ відхилень центру ваги вантажу і навантажень на кран від розгойдуваного на канатах вантажу.

Однак у роботі основна увага приділялася дослідженню стрілових систем тільки з просторовим підвісом вантажу. Також не розглядались електронні системи керування перехідними процесами.

У [2] роботі була запропонована комбінація формування команд і управління зі зворотнім зв'язком, яка може зменшити коливання корисного навантаження. Пристрій для формування вхідного сигналу усуває коливання вантажу, викликані командами оператора, а контролер зворотного зв'язку знижує вплив поривів вітру. Моделювання великого діапазону рухів використовується для аналізу динамічної поведінки стрілових кранів за допомогою запропонованого контролера [2]. Однак у роботі приділено велику увагу лише розгойдуванню під впливом зовнішнього навантаження від поривів вітру.

У роботі [3] для зменшення горизонтальних коливань вантажу знайдено оптимальний закон контролю зворотного зв'язку по станах, що заснований на лінеаризованій моделі.

У статті [4] запропонована докладна математична модель стрілового крана, що враховує всі ступені свободи (DoFs), які характеризують цей тип системи (тобто два повороти, довжина каната і кути повороту корисного навантаження). Незважаючи на всю складність моделі, спроектовано нелінійний закон управління, який використовує всі стани моделі для управління крана в бік бажаного еталона[4].

Також було проаналізовано винаходи або способи, які сприяють зменшенню коливань.

У винаході [5] управління являє собою гасіння сферичних коливань вантажу за рахунок відповідних компенсувальних рухів стріли під час і в кінці кожного маневру. Це показано на рис. 2, на якому зображені зустрічні рухи, що виконуються кінцем стріли, які протидіють коливанням вантажу. У результаті кут нахилу каната може бути обмежений до менше  $3^\circ$ .

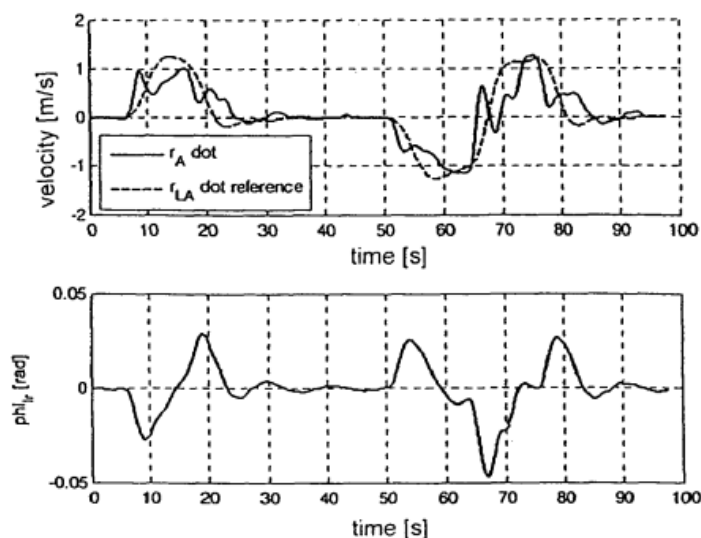


Рис.2 – Швидкість оголовка стріли порівняно з бажаною швидкістю навантаження і радіальним кутом каната, що виникає в результаті руху

Час розрахунку, необхідний для онлайн-розрахунку завдання оптимального рішення в модулі планування шляху, показано на рис. 3. Отриманий час розрахунку становить від 54 мсек до 66 мсек., що є вирішальним для цієї надзвичайно короткої реакції планування шляху на специфікації машиніста крана, та є швидка розв'язність через подальший лінійний шлях

нелінійного управління і нелінійної кранової системи, а також довжини, що збільшується, інтервали між контрольними точками прогнозу в межах горизонту прогнозування.

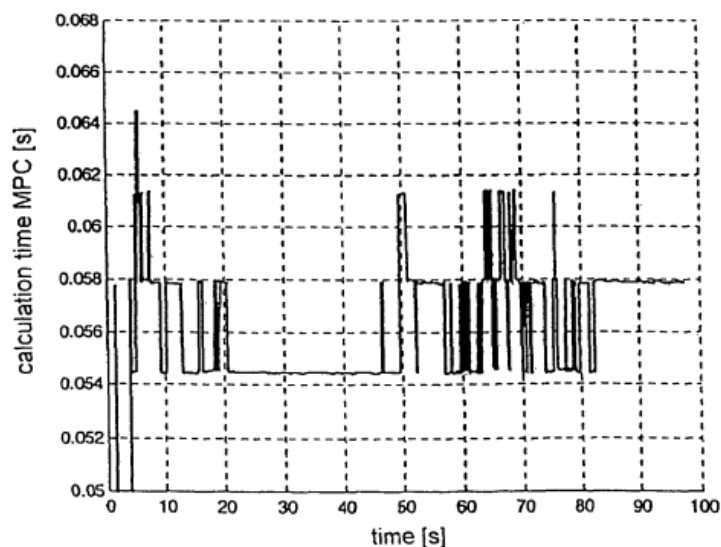


Рис. 3 – Час, необхідний для обчислення бажаних траєкторій

Винахід [6] забезпечує надійний та ефективний керівний процес для управління коливанням вантажу, підвішеному до точки, якою можна управляти у трьох вимірах з обертовим стріловим краном.

Принципом дії винаходу [7] є гіроскопічний ефект. Через розширення конструктивних особливостей підвищується ефективність гасіння коливань у двох взаємно вертикальних площинах. Результат досягається наявністю в пристрої горизонтальної та вертикальної рам з асинхронним двигуном, установленим в останній.

Відомий спосіб управління і захисту вантажопідіймальних кранів можна описати так: якщо в момент відриву ваги від землі канати, на яких висить вантаж, що не займає вертикального положення і починається розгойдування, приводи механізмів крана відключаються з незначною витримкою часу, призначеною для виключення впливу динамічних перешкод [8]. Недоліком цього способу є те, що динаміка вантажу, що переміщується, не враховується. Коливання вантажу мають низьку частоту, відфільтрувати яку неможливо.

Контролер в статті [9] був розроблений з урахуванням властивостей позиціонування і пригнічення коливань шляхом об'єднання управління зі зворотним зв'язком з формуванням вхідних сигналів. Елемент управління складається з окремих модулів, об'єднаних в єдину архітектуру управління. Кожен модуль призначений для управління одним аспектом роботи крана. Модуль управління зі зворотним зв'язком використовується для позиціонування корисного навантаження в бажаному місці, у той час як інший модуль зворотного зв'язку відхиляє перешкоди. Формування входу використовується в третьому модулі, щоб мінімізувати коливання, викликані рухом.

Описана в статті [9] система управління генерує команди опорної швидкості, які при видачі на нелінійний привід і двигуни досягають трьох бажаних результатів у корисному навантаженні: (1) точного позиціонування; (2) пригнічення коливань, викликаних рухом; і (3) усунення перешкод. Структурна схема загальної системи управління показана на рис. 4.



3. Kondo R. Anti-sway control of a rotary crane via switching feedback control / R. Kondo, S. Shimahara // *Control Applications : proceedings of the IEEE International Conference*. – 2004. –Vol. 1. – P. 748–752. doi:10.1109/CCA.2004.1387303.
4. Modeling and control of a 5-dof boom crane / M. Ambrosino, M. Berneman, G. Carbone, A. Dawans, E. Garone // *ISARC : proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2020, Kitakyushu, Japan)*. – Kitakyushu, 2020. – Pp\*.
5. Crane control, crane and method : Pat.no.: US8025167B2. Appl. No.: 12/152.717. Filed: Mar 16, 2008. Date of Patent: Sep. 27, 2011.
6. Anti-sway control for rotating boom cranes: Pat.no.: US5961563A. Appl. No.: 08/786,275. Filed: Jan. 22, 1997. Date of Patent: Oct. 5, 1999.
7. Устройство для гашения колебаний груза, подвешенного на канате строительного крана : пат. 2280607 РФ № 2004115124/11/ Л. А. Голдобина, А. П. Орлов, П. С. Орлов ; заявл. 19.05.2004 ; опубл. 27.07.2006. – Бюл. № 21.
8. Способ управления грузоподъемными механизмами с фиксацией их характеристик и устройство для его осуществления : пат. 2116240 РФ № 97104942/28 / Э. А. Казаков, В. В. Свиридов, И. С. Ходячих, С. В. Орлов, В. С. Котельников, М. Н. Чумак-Жунь, С. И. Галанов, С. С. Самойлов ; заявл. 31.03.1997 ; опубл. 27.07.1998.
9. Sorensen K. A Controller Enabling Precise Positioning and Sway Reduction in Bridge and Gantry Cranes / K. Sorensen, W. Singhose, S. Dickerson // *Control Engineering Practice*. – 2007. – Vol. 15. – P. 825–837. doi:10.1016/j.conengprac.2006.03.005.

#### References:

1. Kazakov, NI 1984, 'Umen'sheniye raskachivaniy gruzha na prostranstvennom podvese pri rabote mekhanizma povorota strelovykh kranov', *Kand.tekh.n. abstract, Leningradskij politehnicheskij institut, Leningrad*.
2. Huang, J, Maleki, E & Singhose, W 2013, 'Dynamics and swing control of mobile boom cranes subject to wind disturbances', *IET Control Theory and Applications*, vol. 7, no. 9, pp. 1187-1195.
3. Kondo, R & Shimahara, S 2004, 'Anti-sway control of a rotary crane via switching feedback control. Control Applications', *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference*, vol. 1, pp. 748-752.
4. Ambrosino, M, Berneman, M, Carbone, G, Dawans, A & Garone, E 2020, 'Modeling and control of a 5-dof boom crane', *ISARC Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Kitakyushu*.
5. *Crane control, crane and method* 2008, US Patent 8025167B2.
6. *Anti-sway control for rotating boom cranes* 1997, US Patent 5961563A.
7. Goldobina, LA, Orlov, AP & Orlov, PS 2006, *Ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy gruzha, podveshennogo na kanate stroitel'nogo krana*, RF Patent 2280607, no. 2004115124/11.
8. Kazakov, EA, Sviridov, VV, Khodyachikh, IS, Orlov, SV, Kotelnikov, VS, Chumak-Zhun, MN, Galanov, SI, Galanov, SI & Samoylov, SS 1998, *Sposob upravleniya gruzopodyemnymi mekhanizmami s fiksatsiyey ikh kharakteristik i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya*, RF Patent 2116240, no. 97104942/28.
9. Sorensen, K, Singhose, W & Dickerson, S 2007, 'A Controller Enabling Precise Positioning and Sway Reduction in Bridge and Gantry Cranes', *Control Engineering Practice*, vol. 15, pp. 825-837.

Стаття надійшла до редакції 21 травня 2021 року.