

УДК 621.87

**АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ БАШТОВИХ КРАНІВ
ДЛЯ УСУНЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ**

©Ловейкін В. С., Афтанділянц Є. Г., Шевчук О. Г.

*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.

Афтанділянц Євген Григорович: ORCID: 0000-0003-2681-0645; aftuev@hotmail.com; доктор технічних наук; завідувач кафедри технологій конструкційних матеріалів і матеріалознавства; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони 12, м Київ, 03041, Україна.

Шевчук Олександр Григорович: ORCID: 0000-0002-7001-2897; oshev4uk@gmail.com; асистент кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони 12, м Київ, 03041, Україна.

Розглянуті методи керування механізмами баштових кранів для усунення коливань вантажу.

Проведено аналіз більше 20 закордонних наукових досліджень, в яких використовувались різні підходи щодо усунення коливань вантажу. Такі як метод оптимальних траєкторій, керування зі зворотним зв'язком з використанням чіткої та нечіткої логіки та класичних і некласичних регуляторів.

Встановлено, що задача по керуванню механізмами баштового крану є досить актуальною. Різні підходи щодо створення систем керування мають свої недоліки та переваги. Метод оптимальних траєкторій знаходить швидкі і ефективні команди. Однак він вимагає знати наперед задану дистанцію і додаткові обмеження повинні бути введені в систему керування щоб бажана траєкторія виконувалась. Крім того, обчислення оптимальних траєкторій може виконуватись досить довго, що знижує продуктивність роботи вантажопідійомної машини. Керування зі зворотнім зв'язком стійке до зовнішніх збурень, проте деколи призводить до неочікуваних рухів, що утруднює оператору керування краном.

Ключові слова: система керування; коливання вантажу; датчик.

Ловейкин В. С., Афтандиянц Е. Г., Шевчук А. Г. «Анализ систем управления механизмами башенных кранов для устранения колебаний груза».

Рассмотрены методы управления механизмами башенных кранов для устранения колебаний груза.

Проведен анализ более 20 зарубежных научных исследований, в которых использовались различные подходы по устранению колебаний груза. Такие как метод оптимальных траекторий, управление с обратной связью с использованием четкой и нечеткой логики и классических и неклассических регуляторов.

Установлено, что задача по управлению механизмами башенного крана является весьма актуальной. Различные подходы к созданию систем управления имеют свои недостатки и преимущества. Метод оптимальных траекторий находит быстрые и

Піднімально-транспортні машини

эффективные команды. Однако он требует знать заранее заданную дистанцию и дополнительные ограничения должны быть введены в систему управления, чтобы желаемая траектория выполнялась. Кроме того, вычисления оптимальных траекторий может выполняться достаточно долго, что снижает производительность работы грузоподъемной машины. Управление с обратной связью устойчиво к внешним возмущениям, однако порой приводит к неожиданным движениям, что затрудняет оператору управления краном.

Ключевые слова: система управления; колебания груза; датчик.

Loveikin V., Aftandiliants Ye., Shevchuk O. “Analysis of anti-swing control systems for tower cranes”.

The methods of control mechanisms tower cranes to eliminate payload oscillations have been considered in the article.

The analysis of more than 20 foreign scientific studies that used different approaches to eliminate vibrations cargo has been provided. An optimal trajectories method and feedback control method using a clear and fuzzy logic and classical and no classical regulators.

It was established that the problem in control mechanisms of tower cranes is quite relevant. Different approaches to creating control systems have advantages and disadvantages. The method of optimal trajectories is fast and finds efficient command. However, it requires predetermined distance and additional restrictions should be imposed in order to control the desired trajectory performed. In addition, the calculation of optimal trajectories can be performed with delay, which reduces the productivity of lifting machines. Feedback control systems sustainable to external disturbances, but sometimes leads to unexpected movements, making it difficult to control the crane operator.

Keywords: control system; payload oscillations; sensor.

1. Постановка проблеми

Баштові крани широко використовуються на будівельних майданчиках промислового і цивільного будівництва. Ефективна робота баштових кранів полягає в переміщенні вантажу з одного положення в інше за найкоротший час без коливань вантажу в кінці руху. Для такої роботи використовується різні системи керування привідними двигунами. Серед усіх систем керування можна виділити три основних: з програмним режимом руху, зі зворотним зв'язком та оптимальних траекторій. Останнім часом проведено багато вітчизняних та закордонних наукових досліджень, що відносяться до керування механізмами вантажопідійомних машин в цілому та баштових кранів зокрема. Це вказує на те, що проблема керування в даний час є досить актуальною.

2. Аналіз публікацій за темою статті

Багато праць присвячено проблемі керування рухом вантажопідійомних машин [1–26]. Зокрема деякі з задач цієї теми були вирішені у роботі [1] разом з детальним оглядом літературних досліджень. У роботах [2–9] керування механізмами вантажопідійомних машин відбувається таким чином щоб забезпечити оптимальну траекторію руху вантажу та усунути

коливання в кінці періоду руху. У роботах [10–12] коливання усуваються шляхом поглинання їхньої енергії. Ще один підхід до усунення коливань вантажу заключається в керуванні зі зворотним зв'язком [13–26] з використанням чіткої та нечіткої логіки та регуляторів.

3. Мета роботи – провести аналіз систем керування механізмами баштового крана які усувають коливання вантажу.

4. Виклад основного матеріалу

Метод оптимальних траєкторій вимагає наперед обрахувати траєкторію руху вантажу. Така задача зазвичай формується як оптимальна, яка мінімізує період руху вантажу. Початкові та кінцеві умови руху вибираються таким чином, щоб усунути коливання вантажу в кінці періоду руху. Така задача розглядається як крайова. Auernig, J. W. та Troger, H. [1] пропонують саме такий підхід розв'язку оптимальних траєкторій для мостових кранів на суднобудівних заводах. Ali R. Golafshani [2] використовує подібний підхід для визначення оптимальних траєкторій баштового крана. Він отримав розв'язок шляхом дискретизації рівнянь за допомогою послідовного квадратичного програмування. На (рис. 1) показано дві траєкторії переміщення вантажу, пунктирною переміщення при звичайному керуванні оператором, суцільною – використовуючи автоматичну систему керування. Проте при цьому координати кінцевої точки руху вантажу мають бути відомі. Усі механізми баштового крану під час руху вантажу працюють в таких режимах, щоб забезпечити рух вантажу по наперед обчисленій траєкторії. Також необхідно використати такий рух, щоб траєкторія оминала перешкоди, що важко виконати в умовах будівництва.

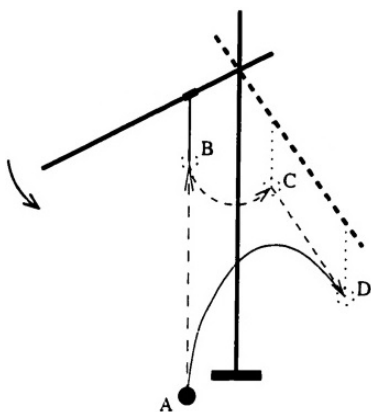


Рис. 1 – Траєкторія переміщення вантажу

Деякі з дослідників зосередились на створенні траєкторій, які дозволяють мінімізувати час переміщення вантажу, а також звести до мінімуму його коливання. Ці траєкторії визначають, як правило, використовуючи методи оптимізації [3]. Цільова функція може бути або час руху [4], або керуючий вплив [5], або кут відхилення вантажу від вертикалі [6].

Ще один важливий метод реалізації траєкторій руху вантажу заключається в послідовності імпульсів прискорення і гальмування. Ці послідовності формуються таким чином, щоб уникнути залишкових коливань вантажу в кінці руху [7-9]. Отриманий спосіб керування без зворотного зв'язку, що робить його чутливим до зовнішніх збурень та зміни параметрів системи. Крім того, таке керування вимагає нульовий кут відхилення вантажу від вертикалі та нульову початкову швидкість, які важко реалізувати на практиці.

Одним із способів усунення коливань вантажу є демпфування шляхом зворотної подачі рушійного зусилля для зменшення кута відхилення вантажу від вертикалі [10, 11.]. Інший спосіб полягає в додаванні механічного абсорбера до конструкції крана [12]. Реалізація цього методу вимагає значної кількості енергії, що робить його непрактичним.

Піднімально-транспортні машини

Ще один спосіб базується на керуванні зі зворотнім зв'язком. Управління зі зворотним зв'язком є добре відомо, менш чутливе до зовнішніх збурень та зміни параметрів. Таким чином, це привабливий спосіб проектування управління краном. В системі керування датчик (відхилення, переміщення і тд.) зв'язаний з контролером, який генерує сигнал для керування рушійним моментом або швидкістю двигуна.

Jason W. Lawrence [13] реалізував систему керування зі зворотним зв'язком для усунення коливань вантажу (рис 2). Схема керування складається з двох контурів.

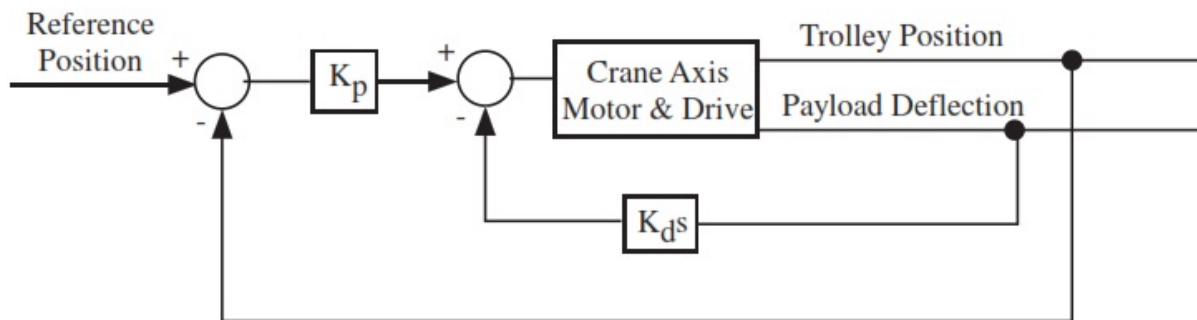


Рис. 2 – Схема керування зі зворотнім зв'язком

Зовнішній контур регулює положення вантажного візка з використанням зворотного зв'язку за положенням з використанням пропорційного регулятора. Внутрішній контур регулює коливання вантажу та використовує диференціальне регулювання, що дає можливість передбачити відхилення вантажу від вертикалі.

Moustafa, K. A. F. та Ebeid, A. M. [14] використовували датчик положення для зворотного зв'язку і лінеризовану просторову модель в системі керування. Al-Garni та ін. [15] також використовували зворотній зв'язок положення, але оптимальне керування було вибрано з чисельної оптимізації. Butler, та ін. [16] застосували еталонну адаптовану модель керування для налаштування коефіцієнта підсилення регулятора враховуючи періодичність вхідного сигналу. Alli, H. та Singh, T. [17] розробили схему пасивного керування, в якій параметри керування були знайдені розв'язком оптимізаційних задач.

Інший підхід до керування зі зворотнім зв'язком базується на розподілі функцій між двома контролерами. Перший відстежує відхилення вантажу від вертикалі, другий слідкує за виконанням оптимальної траєкторії. Контролер стеження може бути або класичним пропорційно-диференціальним регулятором (Henry, R. J. [18]; Masoud Z. та ін [19]), або fuzzy-контролер (Nalley M. J. і Trabia M. B.[20]; Lee, H-H та ін. [21]; Itho O. та ін. [22]; Al-Moussa A. [23]).

Tzu-Sung Wu та ін. [24] запропонували адаптивну схему нечіткого керування баштовим краном на основі стійкості руху за Ляпуновим, щоб подавити вплив зовнішніх збурень і гарантувати зміну кута відхилення вантажу від вертикалі в околі нуля. Проведено динамічне моделювання роботи такої системи. А експериментальне дослідження в даний час у стадії реалізації.

Змінювати висоту підвісу під час переміщення потрібно для уникання перешкод. Цей рух відбувається повільно, і, отже, зміну довжини підвісу вантажу можна розглядати як зміни в системі. Пізніше вплив від зміни довжини підвісу досліджувався за допомогою моделювання, щоб переконатися, що при вибраному режимі руху продуктивність не

Піднімально-транспортні машини

погіршується. Тим не менш, є кілька досліджень, які враховують зміну підвісу при переміщенні вантажу, наприклад Auernig, J. W. та Troger, H. [1].

Вплив ваги вантажу на динаміку руху, як правило, ігнорується. Тим не менш, Lee, H.-H. [25] та Omar H. M. і Nayfeh A. H. [3] враховують його при керуванні порталними і баштовими кранами. З цих досліджень видно, що для дуже важких вантажів в порівнянні з вагою візка, характеристика системи погіршується, якщо вага вантажу не враховується при розробці системи керування.

Nirokazu Araya та ін. [26] розробили систему керування механізмом зміни вильоту гусеничних кранів. Використовуючи цю систему керування, оператор може безпечно виконувати горизонтальне переміщення вантажу під час підйому/опускання стріли. Ця система складається з мікроконтролера датчиків положення стріли довжини канату, ваги вантажу, кутової швидкості двигуна. Алгоритми керування включає зворотній зв'язок та керування з передбачуванням. Вирішене нелінійне вирівнювання за допомогою ПІ регулятора та посилення планування швидкістю двигуна. Робота цих алгоритмів була підтверджена шляхом чисельного моделювання та експерименту. Вдалося утримувати однакову висоту підйому вантажу під час зміни вильоту з похибкою 0,15 метрів.

Вирішено і ряд інших задач оптимального керування рухом вантажопідійомних машин які усувають коливання вантажу на гнучкому підвісі [27-31] а також мінімізують динамічні навантаження у привідних механізмах.

Висновки

Проблема безпечного переміщення вантажу баштовим краном є досить актуальною, про що свідчать численні наукові дослідження. Існують різні підходи до створення систем керування механізмами крана, які виконують безпечно переміщення вантажу без коливань. Кожний з цих підходів має свої недоліки і переваги. Метод оптимальних траєкторій знаходить швидкі і ефективні команди. Однак він вимагає знати наперед задану дистанцію і додаткові обмеження повинні бути введені в систему керування щоб бажана траєкторія виконувалась. Крім того, обчислення оптимальних траєкторій може виконуватись досить довго, що знижує продуктивність роботи вантажопідійомної машини. Керування зі зворотнім зв'язком стійке до зовнішніх збурень, проте деколи призводить до неочікуваних рухів, що утруднює оператору керування краном.

Аналіз закордонних досліджень показав, що зберігається тенденція до удосконалення систем керування баштовим краном шляхом розробки нових алгоритмів програм керування та насичення електронікою.

Список використаних джерел:

1. Auernig J. W. Time optimal control of overhead cranes with hoisting of the load / J. W. Auernig, H. Troger // *Automatica*. – 1987. – Vol. 23, iss. 4. – P. 437–447. doi:10.1016/0005-1098(87)90073-2
2. Golafshani A. R. Modeling and Optimal Control of Tower Crane Motions : PhD thesis / Ali R. Golafshani; University of Waterloo. – Ontario, Canada 1999.
3. Omar, H. M. A simple adaptive feedback controller for tower cranes / H. M. Omar, A. H. Nayfeh // *ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, Pittsburgh, PA, September 9–12. 2001. DETC2001/VIB-21606.
4. Manson G. A. Time-optimal control of an overhead crane model / G. A. Manson // *J. Optimal Control Applications and Methods*. – 1982. – Vol. 3, iss. 2. – P. 115–120, April/June. doi:10.1002/oca.4660030202.
5. Karihaloo B. L. Optimal control of a dynamical system representing a gantry crane / B. L. Karihaloo, R. D. Parbery // *Journal of optimization theory and applications*. – 1982. – Vol. 36, iss. 3. – P. 409–417. doi:10.1007/BF00934354.

Піднімально-транспортні машини

6. Sakaw Y. Optimal control of container cranes / Y. Sakaw, Y. Shindo // *Proceedings of the 8th IFAC Triennial World Congress on Control Science and Technology*, Kyoto, Japan, 1981. – P. 257–265.
7. Karnopp B. H. A strategy for moving a mass from one point to another / B. H. Karnopp, F. F. Fisher, B. O. Yoon // *Journal of the Franklin Institute*. – 1992. – Vol. 329 (5). – P. 881–892.
8. Teo C. L. Pulse input sequences for residual vibration reduction / C. L. Teo, C. J. Ong, M. Xu // *Journal of Sound and Vibration*. – 1998. – Vol. 211, iss. 2. – P. 157–177. doi:10.1006/jsvi.1997.1360.
9. Singhose W. E. Input shaped of a planar gantry crane with hoisting / W. E. Singhose, L. J. Porter, W. Seering // *Proceedings of the American Control Conference*, Albuquerque, New Mexico, June 4–6 1997. – P. 97–100.
10. Cargo pendulation reduction on ship-mounted cranes via boom-luff angle actuation / R. J. Henry, Z. N. Masoud, A. H. Nayfeh, D. T. Mook // *Journal of Vibration and Control*. – 2001. – Vol. 7, no. 8. – P. 1253–1264. doi:10.1177/107754630100700807.
11. Sway reduction on container cranes using delayed feedback controller / Z. N. Masoud, A. H. Nayfeh, R. J. Henry, D. T. Mook // *Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Denver, Colorado. AIAA paper no. 2002-1279. April, 2002.
12. Balachandran B. A mechanical filter concept for control of non-linear crane-load oscillation / B. Balachandran, Y. Y. Li, C. C. Fang // *Journal of Sound and Vibration*. – 1999. – Vol. 228, iss. 3. – P. 651–682. doi:10.1006/jsvi.1999.2440.
13. Lawrence J. W. Crane Oscillation Control: Nonlinear Elements and Educational Improvements : PhD thesis / Jason W. Lawrence ; Georgia Institute of Technology. – 2006.
14. Moustafa K. A. F. Nonlinear modeling and control of overhead crane load sway / K. A. F. Moustafa, A. M. Ebeid // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. – 1988. – Vol. 110, iss. 3. – P. 266–271. doi:10.1115/1.3152680
15. Al-Garni A. Z. Optimal control of overhead cranes / A. Z. Al-Garni, K.A.F. Moustafa, S.S.A.K.J. Nizami // *Control Engineering Practice*. – 1995. – Vol. 3, no. 9. – P. 1277–1284. doi:10.1016/0967-0661(95)00126-F
16. Butler H. Model reference adaptive control of a gantry crane scale model / H. Butler, G. Honderd, J. V. Amerongen // *Control Systems, IEEE*. – 1991. – Vol. 11, iss. 1. – P. 57–62. doi:10.1109/37.103358.
17. Alli H. Passive control of overhead cranes / H. Alli, T. Singh // *Journal of Vibration and Control*. – 1999. – Vol. 5 (3). – P. 443–459. doi:10.1177/107754639900500306.
18. Henry, R. J. Cargo pendulation reduction on ship-mounted cranes: master's thesis / R. J. Henry ; Virginia Polytechnic Institute and State University. – Blacksburg, VA, USA. 1999.
19. Cargo Pendulation Reduction on Ship-Mounted Cranes via Boom-Luff and Slew Angles Actuation / Z. Masoud, A. Nayfeh, R. Henry, D. Mook // 41st AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA paper no. 2000-1543, Atlanta, Georgia, April, 2000.
20. Nalley M. J. Design of a fuzzy logic controller for swing-damped transport of an overhead crane payload / M. J. Nalley, M. B. Trabia // *Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, ASME, University of Nevada. – Las Vegas, 1994. – P. 389–398.
21. Lee H-H. A new anti-swing control of overhead cranes / H-H. Lee, S-K. Cho, J-S. Cho // *IFAC Automation in the Industry*, Korea. – 1997. – P. 115–120.
22. Application of fuzzy control to automatic crane operation / O. Itho, H. Migita, Y. Irie, J. Itaho // *Japanese Journal of Fuzzy Theory and Systems*. – 1994. – N 6 (2). – P. 283–296.
23. Al-Moussa A. Control of rotary cranes using fuzzy logic / A. Al-Moussa, A. Nayfeh, P. Kachroo // *ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania, September 9–12, 2001DETC2001/VIB-21598.
24. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control / Tzu-Sung Wu, Mansour Karkoub, Wen-Shyong Yu, Chien-Ting Chen, Ming-Guo Her, Kuan-Wei Wu // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2015. doi:10.1016/j.fss.2015.01.010.
25. Lee H-H. Modelling and control of a three-dimensional overhead crane / H-H. Lee // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. – 1998. – N 120 (4). – P. 471–476. doi:10.1115/1.2801488
26. Level luffing control system for crawler cranes / Hirokazu Araya, Makoto Kakuzen, Hideki Kinugawa, Tatsuo Arai // *Automation in construction*. – 2004. – Vol. 13, iss. 5. – P. 689–697. doi:10.1016/j.autcon.2004.04.011.
27. Ловейкін В. С. Керування механізмами зміни вильоту та підйому вантажу вантажопідйомного крана / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, Г. В. Шумілов // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. – 2012. – Вип. 79. – С. 31–34.
28. Ловейкін В. С. Оптимізація руху вантажопідйомного крана із траверсною підвіскою вантажу методом динамічного програмування / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – X., 2012. – Вип. 10. – С. 15–32.
29. Ловейкін В. С. Синтез оптимального керування рухом кранового візка. Частина I / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2013. – Вип. 11. – С. 21–33.
30. Ловейкін В. С. Синтез оптимального керування рухом кранового візка. Частина II / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2013. – Вип. 12. – С. 22–30.
31. Ромасевич Ю. Синтез оптимального керування рухом вантажопідйомними кранами / Ю. Ромасевич, В. Ловейкін // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. – 2014. – Вип. 83. – С. 26–33.

References

1. Auernig, J & Troger, H 1987, 'Time optimal control of overhead cranes with hoisting of the load', *Automatica*, vol. 23, iss. 4, pp. 437–447. doi:10.1016/0005-1098(87)90073-2.
2. Golafshani Ali R 1999, 'Modeling and Optimal Control of Tower Crane Motions', PhD thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.

3. Omar, H & Nayfeh, A 2001, 'A simple adaptive feedback controller for tower cranes', *ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, September 9-12, DETC2001/VIB-21606*, Pittsburgh, PA.
4. Manson, G 1982, 'Time-optimal control of an overhead crane model' *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 3, iss. 2, pp. 115-120. doi:10.1002/oca.4660030202.
5. Karihaloo, B & Parbery, R 1982, 'Optimal control of a dynamical system representing a gantry crane', *Journal of optimization theory and applications*, vol. 36, iss. 3, pp. 409-417. doi:10.1007/BF00934354.
6. Sakaw, Y & Shindo, Y 1981, 'Optimal control of container cranes', *Proceedings of the 8th IFAC Triennial World Congress on Control Science and Technology*, Kyoto, Japan, pp. 257-265.
7. Karnopp, B, Fisher, F & Yoon, B 1992, 'A strategy for moving a mass from one point to another', *Journal of the Franklin Institute*, vol. 329(5), pp. 881-892.
8. Teo, C, Ong, C & Xu, M 1998, 'Pulse input sequences for residual vibration reduction', *Journal of Sound and Vibration*, vol. 211, iss. 2, pp. 157-177. doi:10.1006/jsvi.1997.1360.
9. Singhose, W, Porter, L & Seering, W 1997, 'Input shaped of a planar gantry crane with hoisting', *Proceedings of the American Control Conference, June 4-6, Albuquerque, NM*, pp. 97-100.
10. Henry, R, Masoud, Z, Nayfeh, A & Mook, D 2001, 'Cargo pendulation reduction on ship-mounted cranes via boom-luff angle actuation', *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, no. 8, pp. 1253-1264. doi:10.1177/107754630100700807.
11. Masoud, Z, Nayfeh, A, Henry, R & Mook, D 2002, 'Sway reduction on container cranes using delayed feedback controller', *Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA paper no. 2002-1279*, Denver, Colorado. April, 2002
12. Balachandran, B, Li, Y & Fang, C 1999, 'A mechanical filter concept for control of non-linear crane-load oscillation', *Journal of Sound and Vibration*, vol. 228, iss. 3, pp. 651-682. doi:10.1006/jsvi.1999.2440.
13. Lawrence Jason W 2006, 'Crane Oscillation Control: Nonlinear Elements and Educational Improvements', PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.
14. Moustafa, K & Ebeid, A 1988, 'Nonlinear modeling and control of overhead crane load sway', *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 110, iss. 3, pp. 266-271. doi:10.1115/1.3152680.
15. Al-Garni, A, Moustafa, K & Nizami, S 1995, 'Optimal control of overhead cranes', *Control Engineering Practice*, vol. 3, no. 9, pp. 1277-1284. doi:10.1016/0967-0661(95)00126-F
16. Butler, H, Honderd, G & Amerongen, J 1991, 'Model reference adaptive control of a gantry crane scale model', *Control Systems, IEEE*, vol. 11, iss. 1, pp. 57-62. doi:10.1109/37.103358.
17. Alli, H & Singh, T 1999, 'Passive control of overhead cranes', *Journal of Vibration and Control*, vol. 5 (3), pp. 443-459. doi:10.1177/107754639900500306.
18. Henry, R 1999, 'Cargo pendulation reduction on ship-mounted cranes', Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA.
19. Masoud, Z, Nayfeh, A, Henry, R & Mook, D 2000, 'Cargo Pendulation Reduction on Ship-Mounted Cranes via Boom-Luff and Slew Angles Actuation', *41st AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA paper no. 2000-1543*, Atlanta, Georgia.
20. Nalley, M & Trabia, M 1994, 'Design of a fuzzy logic controller for swing-damped transport of an overhead crane payload', *Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, ASME, University of Nevada, Las Vegas, pp. 389-398.
21. Lee, H, Cho, S & Cho, J 1997, 'A new anti-swing control of overhead cranes', *Proceedings of the IFAC Automation in the Industry*, Korea, pp. 115-120.
22. Itho, O, Migita, H, Irie, Y & Itaho, J 1994, 'Application of fuzzy control to automatic crane operation', *Japanese Journal of Fuzzy Theory and Systems*, no. 6(2), pp. 283-296.
23. Al-Moussa, A, Nayfeh, A, & Kachroo, P 2001, 'Control of rotary cranes using fuzzy logic', *Proceedings of the ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, September 9-12, DETC2001/VIB-21598*, Pittsburgh, PA.
24. Wu, T-S, Karkoub, M, Yu, W-S, Chen, C-T, Her, M-G & Wu, K-W 2015, 'Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control', *Fuzzy Sets and Systems*. doi:10.1016/j.fss.2015.01.010.
25. Lee, H-H 1998, 'Modelling and control of a three-dimensional overhead crane', *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, no. 120(4), pp. 471-476. doi:10.1115/1.2801488.
26. Araya, H, Kakuzen, M, Kinugawa, H & Arai, T 2004, 'Level luffing control system for crawler cranes', *Automation in construction*, vol. 13, iss. 5, pp. 689-697. doi:10.1016/j.autcon.2004.04.011.
27. Loveikin, V, Romasevych, Yu & Shumilov, H 2012, 'Keruvannia mekhanizmamy zminy vylotu ta pidiomu vantazhu vantazhopidiomnoho krana', *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, iss. 79, pp. 31-34.
28. Loveikin, V & Romasevych, Yu 2012, 'Optimization of hoisting crane motion with traverse load assembly by of dynamic programming method', *Mashynobuduvannia*, iss. 10, pp. 15-32.
29. Loveikin, V & Romasevych, Yu 2013, 'Crane carriage movement optimal control. Part I', *Mashynobuduvannia*, iss. 11, pp. 21-33.
30. Loveikin, V & Romasevych, Yu 2013, 'Crane carriage movement optimal control. Part II', *Mashynobuduvannia*, iss. 12, pp. 22-30.
31. Romasevych, Yu & Loveikin, V 2014, 'The synthesis of crane movement optimal control', *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, iss. 83, pp. 26-33.

Стаття надійшла до редакції 29 квітня 2015 р.