

The paper analyzes the dynamic movement of bridge crane with mechanical characteristics of mechanized drive motor horizontal displacement. The task solved by numerical integration differential equations of bridge crane motion. The results are illustrated graphs that characterize the transition process of overlocking overhead crane.

Crane, truck, dynamic loading, dynamic model, mathematical model, reduced weight, beam crane, optimization.

УДК 681.508

АНАЛІЗ СПОСОБІВ КЕРУВАНЬ ВАНТАЖОПІДЙОМНИМИ МАШИНАМИ

**С.Ф. Пилипака, В.С. Ловейкін, доктори технічних наук
П.В. Лимар, здобувач***

У статті проведений аналіз сучасних систем керування вантажопідйомних машин. Описано інтелектуальні алгоритми управління вантажопідйомними механізмами, засновані на рішенні оберненої задачі динаміки і застосуванні нечіткої логіки. Алгоритми керування знижують вимоги до кваліфікації операторів вантажопідйомних механізмів і дозволяють перенести "інтелект" навченого персоналу на системи управління.

Режим руху, датчик, керування краном, привід, зворотній зв'язок.

Постановка проблеми. Крани все частіше використовуються в транспорті і будівництві. Вони також стають більшими, швидшими і вищими, вимагаючи ефективного керування, щоб гарантувати швидке переміщення вантажу та задовольняти вимогам безпеки. Робочий рух при переміщенні кранового візка характеризується перехідними режимами роботи, тобто систематичними прискореннями та гальмуваннями. При таких короточасних змінах швидкості як в деталях механізмів, так і у вузлах металоконструкції виникають динамічні навантаження, які можна виявити за допомогою обраної розрахункової моделі.

В процесі роботи крана, візок з підвішеним на гнучкому підвісі вантажем здійснює постійні переміщення вздовж несучої ферми та консолей. Процес переміщення візка включає в себе розгін,

*Науковий керівник – доктор технічних наук В.С. Ловейкін

© С.Ф. Пилипака, В.С. Ловейкін, П.В. Лимар, 2015

переміщення з номінальною швидкістю та гальмування. Такі перехідні режими викликають значні динамічні навантаження в механізмі приводу візка і крана в цілому, що впливає на надійність і довговічність, а розгойдування вантажу на продуктивність і ергономічність роботи.

Також відомо [1], що при роботі кранів спостерігаються маятникові коливання вантажу, котрі викликають нерівномірний рух вантажопідйомних механізмів, вантажних візків, додаткові навантаження на силові елементи, створюють незручності при їх експлуатації, а також збільшують ризик виникнення аварійних ситуацій.

Мета досліджень. Основною метою даного дослідження є аналіз способів керування вантажопідйомними машинами при яких небажані явища (динамічні навантаження, коливання вантажу) будуть відсутні або матимуть мінімальний вплив, а бажані (надійність, робастність, продуктивність, ергономічність) покращені.

Результати досліджень. Підйомно-транспортні механізми застосовуються практично у всіх областях промисловості. Для транспортування вантажів в промисловості, на будівельних майданчиках, складах і в портах широко використовуються підйомні крани. Підйомні крани розрізняються по конфігурації робочої зони, виду переміщуваних вантажів і точності позиціонування. В залежності від вимог за даними характеристиками існують різні типи конструкцій кранів. Для переміщення важких вантажів частіше використовують порталні (козлові) крани. Конструкція порталного крана припускає наявність спеціального візка з прямолінійним рухом по напрямних рейках і троса, за допомогою якого корисний вантаж кріпиться до візка. Портальний кран може пересуватися по рейках, це дозволяє здійснити транспортування вантажу в будь-яку точку тривимірного простору в межах робочої зони крана. Портально-поворотні крани найчастіше застосовуються в портах для завантаження кораблів, а також в якості навантажувальних кранів на залізницях. Переваги портално-поворотного крана полягають у відносно великій робочій зоні при меншій займаній площі. Поворотні баштові крани характеризуються значною висотою і найчастіше застосовуються в таких умовах, коли вантаж повинен головним чином переміщатися вертикально.

Системи керування підйомно-транспортними механізмами зазвичай є багатозадачними. Вони повинні бути робастними, швидкодіючими, точними, і за своєю суттю замінювати дії навченого персоналу, тобто вони повинні володіти "інтелектом". Система управління повинна переміщувати вантаж з максимально можливою швидкістю, під час транспортування мінімізувати коливання вантажу і повністю гасити їх в місці зупинки. Також мають бути враховані можливі зміни параметрів системи, таких як довжина каната і вага вантажу. При

розробці алгоритмів керування повинні враховуватися і питання практичної реалізації: потужність керуючого впливу, максимальні прискорення і швидкості тощо. Для виключення можливості зіткнень з перешкодами вантаж не повинен виходити при транспортуванні за межі заданого коридору.

Система керування процесом переміщення вантажу може бути як розімкнутою, так і замкнутою. Розімкнуте управління характеризується більшою чутливістю до змін параметрів і збурень. При створенні замкнутої системи управління виникає необхідність у відповідних датчиках. Інформацію про положення і швидкість візка зазвичай отримують з системи керування електроприводом візка. Складніше отримати інформацію про кут відхилення вантажу. Можна використовувати датчик технічного зору, проте недоліками відеосистеми є складність обслуговування та висока вартість [2]. При відомій довжині каната оцінити кут відхилення можна по електромагнітному обертальному моменту і кутовій швидкості двигуна візка, іншими словами в структуру системи управління необхідно включити спостерігач динамічного навантаження.

Взаємодія між механізмом руху і підвішеним вантажем призводить до розгойдування останнього. Якщо амплітуда коливань перевищує задану межу, вони повинні згасати або повинна бути зупинена операція, поки коливання не припиняться. У будь-якому випадку це призведе до погіршення швидкодії системи. Ці проблеми змусили багатьох дослідників розробити алгоритми управління, що дозволяють автоматизувати операції підйомного крана. Однак більшість існуючих схем не є придатними для практичного застосування. Тому велика кількість промислових підйомних кранів не автоматизовано і все ще залежить від дій людини. При цьому забезпечити належну компенсацію коливань може тільки висококваліфікований оператор (кранівник).

Існують різні способи управління підйомним краном, засновані як на розімкнутій системі, так і на системі управління зі зворотним зв'язком. Автоматизацію підйомного крана можна розділити на два підходи. У першому підході оператор зберігається в ланцюзі керування, а сили, що переміщують вантаж, певним чином змінюються, щоб полегшити роботу оператора. Один із способів полягає у керуванні демпфером із зворотнім зв'язком кута відхилення вантажу і його кутової швидкості або зворотній зв'язок затримки кута відхилення [3, 4]. Такий зворотний зв'язок передбачає додаткову траєкторію руху, яка передбачена роботою оператора. Наступний спосіб полягає у встановленні механічного демпфера в конструкцію крана [5]. Реалізація цього методу передбачає витрати значної кількості енергії, що робить його непрактичним.

У другому підході, робота оператора виключається і операція повністю автоматизована. Це можна реалізувати кількома методами. Перший спосіб заснований на проходженні траєкторії переміщення вантажу до місця призначення з мінімальними коливаннями. Ця траєкторія формується оптимальними методами управління. Другий спосіб заснований на зворотному зв'язку положення візка і кута відхилення. Третій спосіб заснований на конструкції контролера з двох частин: з контролера, що усуває коливання і контролера стеження за положенням візка. Кожен з них працює окремо, а потім об'єднуються для забезпечення продуктивності і стабільності системи в цілому.

Застосування як оптимальної за часом розімкнутої системи управління підйомним краном [6], так і розімкнутої системи управління, в якій вхідний сигнал формується таким чином, щоб при переміщенні візка в заданне положення не викликати надмірних коливань вантажу [7], дає погані результати, оскільки управління без зворотного зв'язку чутливо до зміни параметрів системи (наприклад, довжини каната) і не може компенсувати вплив вітру. Ці методи також не дозволяють уникнути залишкових коливань вантажу.

Управління зі зворотним зв'язком, як відомо, менш чутливе до змін параметрів і збурень. Тому в більшості досліджень останніх років запропоновано алгоритми замкнутого управління: від звичайного ПІД-регулятора (пропорційно інтегрально-диференціального регулятора) до інтелектуальних підходів. Зокрема, Омар запропонував ПД-регулятори (пропорційно-диференціальні регулятори) як для позиціонування, так і для усунення коливань [8]. Однак відомо, що керування з використанням ПД-регулятора не ефективно в усуненні статичної помилки. Тому також був запропонований і ПІД-регулятор для управління системою порталного крана [9]. Однак робота регулятора погіршується, коли відбувається насичення силового приводу.

Для побудови традиційних регуляторів необхідно мати "точну" математичну модель об'єкта управління, а потім синтезувати регулятор, який реалізує необхідний алгоритм управління. Так як математичний опис підйомного крана являє собою систему нелінійних нестационарних диференціальних рівнянь, виконати синтез регулятора аналітичним шляхом складно, це завдання може бути вирішене тільки для малих кутів відхилення вантажу шляхом лінеаризації відповідних рівнянь і "заморожування" їх коефіцієнтів. Для систем такого типу переважно використання нетрадиційних регуляторів. Як відомо, для управління складними процесами, коли не існує простий математичної моделі, можна використовувати системи з нечітким керуванням. В [2] описана система, в якій застосували апарат нечіткої логіки як до пристрою керування положенням візка, так і до дем-

пфірування коливань. Розглянуті вище способи управління призвели б до доброї роботи за умови використання точної моделі та її параметрів у регуляторі.

Однак відомо, що моделювання є складним і трудомістким процесом. Крім того, потрібна ідентифікація тих параметрів підйомного крана, які неможливо виміряти. Ідентифікація параметрів – це теж складний і трудомісткий процес. Крім того, передові регулятори мають тенденцію бути все більш складними і, відповідно, проблемними з точки зору їх реалізації в масштабі реального часу. Дуже часто налаштовувати такі регулятори повинні інженери, які не мають досвіду в роботі з подібними системами управління. Отже, проста конструкція і структура регулятора дуже важливі з практичної точки зору. Недоліком замкнутих систем є потреба в датчиках положення візка і кута відхилення вантажу. Крім того, створення датчика вимірювання коливань в реальній системі порталного крана не є легким завданням, оскільки є підйомний механізм на паралельному гнучкому підвісі. У деяких дослідженнях зосередилися на схемах управління з відеосистемою, яка на практиці знайшла більше застосування з огляду на те, що не потрібно розташовувати датчик на стороні вантажу. Недоліками управління зі зворотним зв'язком на основі CCD-камери (датчика технічного зору) є складність обслуговування та висока вартість.

У розглянутих випадках доцільним представляється використання методики, заснованої на вимірюванні електромагнітного обертального моменту, кутової швидкості двигуна та застосуванні спостерігача динамічного навантаження [10]. Цей метод дозволяє оцінити кут відхилення вантажу за доступною з силового приводу інформації і не вимагає застосування дорогих і технічно складних датчиків. Завдання запобігання виникнення коливань вантажу в підйомно-транспортних механізмах може вирішуватися двома шляхами. Перший шлях полягає в демпфіруванні коливань замкнутою системою управління з використанням вимірювальних або оцінюючих пристроїв кутової швидкості та/або кута підвісу. Другий шлях полягає у недопущенні коливань шляхом установки в ланцюг розімкнутого управління формуючих фільтрів (шейпінг-фільтрів), налаштованих на частоту коливань вантажу.

Замкнута система управління гасить всі коливання вантажу, у тому числі від вітрових та інших збурень, але має на потребу установки спеціальних датчиків. Розімкнуте управління з формуючим фільтром в принципі не може гасити ніяких коливань, воно лише дозволяє зменшити ефект збудження коливань в процесі управління, ніяких додаткових датчиків при цьому не вимагається. Найбільшого поширення в системі без зворотного зв'язку по куту відхилення ван-

тажу отримали шейпінг-регулятори (shaping control, shaper). Алгоритм їх роботи заснований на тимчасовому перерозподілі силового впливу на візок на етапах розгону і гальмування при збереженні незмінної величини сумарного впливу. За рахунок подовження перехідного режиму руху тельфера або візка з однієї швидкості на іншу забезпечується накладення коливань вантажу, при цьому зрушення керуючого впливу на період та / або півперіод обчислених коливань вантажу забезпечує в ідеальному випадку повне їх згасання.

Існує безліч різновидів шейпінг-алгоритмів. Найбільш поширені: ZV-shaper (Zero-Vibration shaper), ZVD-shaper (Zero-Vibration and Derivative shaper), ZVDDshaper (Zero-Vibration and Derivative-Derivative shaper), ZVDDD-shaper (Zero-Vibration and Derivative-Derivative-Derivative shaper), різновиди з одною, двома і трьома кривими – EI-shaper (Extra-Insensitive shaper), інверсний в порівнянні з EI – SI-shaper (Specified-Insensitivity shaper).

Аналіз різних алгоритмів керування підйомно-транспортними механізмами дозволяє зробити наступні висновки. Шейпінг-фільтри призводять до зменшення амплітуди коливань значно швидше, ніж стандартні фільтри [11]. Шейпінг-фільтри мають тривалість коливань в межах від 0,7 до 2,0 періодів, а стандартні фільтри: від одного до більш ніж 10 періодів коливань. Більшість фільтрів має показник 3 періоди і більше. Шейпінг-фільтри володіють великою швидкодією в порівнянні з традиційними цифровими фільтрами, це пояснюється особливостями їх побудови і початковою (на відміну від стандартних фільтрів) спрямованістю на вирішення розглянутих завдань.

Незважаючи на те, що сьогодні найбільш поширеним способом гасіння коливань вантажу при відсутності будь-якої інформації про кут його відхилення є шейпінг-управління, цей метод має ряд недоліків: складно врахувати обмеження електроприводів вантажопідйомних механізмів щодо прискорення, а дискретний характер накладення коливань призводить до необхідності різкої зміни швидкості, що несприятливо позначається на силовій частині. Застосування ж задавання інтенсивності вхідного сигналу призводить до збільшення часу реакції системи, а згладжування заданої швидкості на виході шейпінг-фільтра погіршує його якісні показники.

Для розрахунку розімкнених систем зазвичай задаються бажаним законом зміни вихідних координат крана і перераховують їх у вхідні координати. Такий перерахунок є вирішенням оберненої задачі динаміки математичної моделі крана і може розглядатися як універсальна основа для обчислення сигналу формування фільтра. Рішення зворотної задачі динаміки для обчислення сигналу управління може бути замінено замкнутою схемою, що складається з одиниці в прямому колі і моделі об'єкта управління з ідеальним регуля-

тором в колі зворотного зв'язку. Така схема дозволяє вирішувати задачу в реальному часі за допомогою рекурсивного фільтра, що відображає бажані динамічні властивості крана з регулятором. Описаний алгоритм незмінно дає результат у вигляді режекторного фільтра, налаштованого на частоту коливань вантажу.

До підйомно-транспортних механізмів пред'являються різні вимоги в залежності від їх типу та призначення. Для кожного конкретного випадку потрібне відповідне налаштування системи керування, при цьому слід враховувати вимоги по швидкодії, точності позиціонування і амплітуді допустимих коливань. У деяких випадках визначальним є не якість згасання коливань, а довговічність механізмів. У такій ситуації першочерговим стає завдання мінімізації зносу силових елементів в процесі управління і, як наслідок, виникають обмеження на реверс двигуна, що часто потрібно для більш якісного гасіння коливань вантажу.

Ефективним в цьому випадку є застосування управління з нечіткою логікою функціонування (fuzzy-control), оскільки в системі з нечіткою логікою управління можливо врахувати сукупність великої кількості суперечливих факторів, що впливають як на точність позиціонування, так і на ступінь зносу елементів системи: виникають у процесі переміщення коливання вантажу і несучих частин підйомно-транспортних механізмів (баштових та козлових кранів), швидкість вітру і його пориви (актуально для будівельних кранів), що змінюється маса вантажу (при неможливості її точного вимірювання).

Використання нечіткої логіки для усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі запропоновано в роботі [12]. Тут розглядається двомасова коливальна система, в якій побудовано алгоритм керування з двома умовами. По-перше, якщо маса вантажу відхиляється від вертикалі з деякою швидкістю, то до маси візка необхідно прикласти силу, яка буде рухати цю масу в тому ж напрямку і приблизно з тією ж швидкістю. По-друге, якщо маса вантажу відхилена на деякий кут і її швидкість близька до нуля, то до маси візка необхідно в тому ж напрямку прикласти зусилля, яке б давало масі візка приблизно таке ж прискорення.

Застосування системи з нечіткою логікою функціонування робить можливим налаштування коефіцієнтів системи управління виходячи з комплексного критерію, що дозволяє з мінімальними витратами пристосувати алгоритм управління до конкретного випадку.

Висновки

Порівняння шейпінг-управління з розробленими алгоритмами дозволяє зробити висновок, що шейпінг-фільтри не настільки ефективні для формування керуючого впливу в порівнянні з безперервними регуляторами. Розроблені алгоритми мають істотні переваги

роботи: вимагають менше часу і забезпечують низький рівень залишкових коливань. Якість їх роботи визначається точністю ідентифікації частоти коливань вантажу (при наявності навіть зашумленої інформації про який-небудь параметр, пов'язаний з частотою коливань).

При відсутності будь-якої інформації система може бути реалізована тільки із застосуванням формуючого фільтра. Однак до його побудови слід підходити шляхом перетворення розробленого регулятора для замкнутої системи. У цьому випадку якість роботи регулятора буде залежати від точності відповідності моделі реальному об'єкту управління, і відповідно виникає питання забезпечення двох суперечливих вимог: високої швидкодії і слабкої чутливості до зміни параметрів об'єкта управління.

Застосування системи з нечіткою логікою функціонування дозволяє шляхом моделювання процесу мислення людини (процедури прийняття ним рішення) здійснювати настройку коефіцієнтів системи управління виходячи з комплексного критерію: з урахуванням часу переміщення, точності позиціонування, ступеня згасання коливань, ступеня зносу силових елементів, обмежень на реверс двигуна при переході з однієї швидкості на іншу та іншого. Застосування нечіткої логіки дозволяє скоротити терміни проектування інтелектуальних систем і робить можливим компонентне (модульне) проектування.

Список літератури

1. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
2. Kim Y.S. A new visionless anti-sway control system for container cranes / Kim Y.S., Yoshihara H., Fujioka N., Kasahara H., Shim H., Sul S.K. // Industry Applications Conference. 2003. Vol. I. P. 262–269.
3. Henry, R.J., 2001, "Cargo pendulation reduction on ship-mounted cranes via boom-luff angle actuation" / Masoud, Z.N., Nayfeh, A.H., Henry, R.J., and Mook D.T. // Journal of Vibration and Control 7, P. 1253–1264.
4. Masoud, Z.N. Sway reduction on container cranes using delayed feedback controller / Masoud, Z.N., Nayfeh, A.H., Henry, R.J., and Mook D.T. // In Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Denver, CO, 2002. AIAA-2002-1279.
5. Balachandran, B., Lee, Y.Y., and Fang, C.C., 1999, "A mechanical filter concept for control of non-linear crane-load oscillation," Journal of Sound and Vibration 228(3), P. 651–682.
6. Manson G.A. Time-optimal control of an overhead crane model / G.A. Manson // Optimal Control Applications & Methods. 1982. Vol. 3. No. 2. P. 115–120.
7. Auernig J.W. Time optimal control of overhead cranes with hoisting of the load / Auernig J.W., Troger H. // Automatica. 1987. Vol. 23. No. 4. P. 437–447.
8. Ridout A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback / Ridout A.J. // Journal of Electrical and Electronics Engineering. 1989. Vol. 9. No. 1/2. P. 17–26.

9. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes. PhD Dissertation. / Omar H.M. // Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003.
10. Хаджинов М.К. Система управления подъемным краном на базе квази-модального регулятора с функцией подавления колебаний перемещаемого груза / М.К. Хаджинов, А.С. Шмарловский // Доклады БГУИР. – Минск. – № 7. – 2009. – С. 38–43.
11. Singer N. Comparison of Filtering Methods for Reducing Residual Vibration / Singer N., Singhose W., Seering W. // European Journal of Control. – 1999. – № 5. – P. 208–218.
12. Терехов В.М. Системы управления электроприводов : учебник / В.М. Терехов, О.И. Осипов ; под ред. Терехова В.М. – Саратов: Изд. центр „Академия”, 2005. – 300 с.

В статье проведен анализ современных систем управления грузоподъемных машин. Описаны интеллектуальные алгоритмы управления грузоподъемными механизмами, основанные на решении обратной задачи динамики и применении нечеткой логики. Алгоритмы управления снижают требования к квалификации операторов грузоподъемных механизмов и позволяют перенести "интеллект" обученного персонала в систему управления.

Режим движения, датчик, управление краном, привод, обратная связь

The paper analyzes modern control systems of load machines. Described intelligent control algorithms lifting devices, based on the solution of dynamics inverse problem and application of fuzzy logic. Control algorithms reduce the qualifications of lifting mechanisms operators and can move "intelligence" of trained personnel in the control system.

Mode of motion, sensor, control crane, drive, feedback.

УДК 629.631.554

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УДОСКОНАЛЕНОЇ ПЕРЕВАЛОЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

**С.Г. Фришев, доктор технічних наук
Л.О. Чорна, студентка**

Пропонується методика визначення раціональних параметрів удосконаленої перевалочної технології для цукрових буряків.

Цукрові буряки, збирання, транспортування, ефективність, продуктивність.

© С.Г. Фришев, Л.О. Чорна, 2015