

УДК 62-83:681.52

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНУ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

ОЛЕЙНИКОВ М.О. аспірант, кафедра електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: oleinikov.m@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5999-5733;

Мета роботи. Дослідження особливостей роботи системи автоматичного керування електроприводом мостового крана з урахуванням пружних зв'язків.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети були використані методи системного аналізу та моделювання за допомогою програмних засобів. Це дозволило точно відобразити процеси, що відбуваються в системі, а також перевірити різні сценарії роботи та їхній вплив на загальну ефективність системи.

Отримані результати. У ході дослідження було розглянуто систему автоматичного керування електроприводом та важливість урахування пружних зв'язків. Запропонована адаптивна система використовує нейронну мережу RBF. Використання запропонованого регулятора забезпечує стійкість до збурюючих впливів і дозволяє нівелювати коливання вантажу. Адаптивність системи забезпечується при зміні параметрів (навантаження, швидкість руху механізмів, жорсткість, точність позиціонування тощо) для відповідності умовам роботи мостового крана. Завдяки цьому, система здатна ефективно працювати в умовах змінних навантажень і зовнішніх впливів. Проведено комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування, що підтвердило її ефективність при різних умовах експлуатації.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в розробці та обґрунтуванні адаптивної системи керування електроприводом мостового крана, яка враховує пружні зв'язки. Дана система забезпечує гасіння коливань вантажу та підвищує точність позиціонування крана. Це досягається шляхом порівняння з існуючими методами керування за різними критеріями. Запропоновано використання алгоритму адаптації параметрів системи керування в реальному часі (навантаження, швидкість руху візка, довжина троса, жорсткість механізмів, тощо), що значно покращує (на 5-7% точність позиціонування, на 8-10% стабільність роботи) показники роботи системи. Крім того, в ході дослідження було підтверджено здатність системи адаптуватися до різних умов роботи (змінене навантаження, варіації швидкості руху, нерівномірність дії зовнішніх збуджень), забезпечуючи стабільність і надійність її функціонування, що особливо важливо для забезпечення безперервної роботи крана в промислових умовах.

Практична цінність. Застосування даної системи дозволяє підвищити продуктивність мостового крана на 5-10% порівняно з традиційними системами керування. Впровадження системи в промислових умовах дозволить значно покращити ефективність і безпеку роботи крана, а також знизити витрати на технічне обслуговування і ремонт. Крім того, дана система може бути використана для модернізації вже існуючих кранів, що дозволить подовжити термін їх експлуатації та підвищити надійність роботи. Це відкриває нові можливості для підвищення ефективності промислових процесів, пов'язаних з використанням мостових кранів, і забезпечує кращі умови праці для операторів.

Ключові слова: кранові механізми, мостовий кран, електропривод, система автоматичного керування, адаптивна система, пружні зв'язки.

I. ВСТУП

В сучасному логістичному процесі виробництва мостові крани відіграють провідну роль. Безвідмовність, надійність, швидкість мостового крана має великий вплив на ефективність виробництва.

Під час експлуатації механізмів мостового крана виникають велика кількість поломок, які пов'язані зі змінами навантажень електроприводів мостового крана. Дані навантаження мають вигляд перехідного процесу механічної підсистеми, що має пружні властивості.

Саме тому, проектувальники мостових кранів повинні враховувати фактори впливу на ефективність

роботи мостового крана, такі як: динамічні навантаження, адаптивність до змінних умов, точність керування, безпека та надійність, ефективність, економічність та доцільність.

В останні роки було запропоновано велику кількість методів керування мостовими кранами, однак значна частина даних методів не враховує вплив пружних зв'язків.

Пружні зв'язки виникають через властивість гнучкості конструктивних елементів мостового крана, наприклад трос або балка. Критично важливим для точності позиціонування та зменшення коливань вантажу під час транспортування є врахування цих зв'язків. Таким чином, серед головних напрямків під-

вищення надійності мостового крана є питання зниження динамічних навантажень на їхні елементи, досягається це шляхом використання електроприводу, який має відповідну систему керування, що формує керуючий вплив, враховує поточний стан навантаження на елементи механічних системи та перешкоджає розвитку перехідних процесів коливального характеру.

У статті розглянуто систему керування електроприводом мостового крана, яка буде враховувати пружні зв'язки.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Електроприводи кранових механізмів за характером навантажень можна розділити на дві групи: з переважно активним статичним моментом і переважно з реактивним моментом. До першої групи належать електроприводи вантажних лебідок і стрілових лебідок із неврівноваженою стрілою, а до другої групи – електроприводи механізмів горизонтального пересування [1].

У роботі [2] було виконано розрахунок оптимальної за динамічними навантаженнями механічної характеристики під час гальмування двоступеневим протиувімкненням механізму пересування вантажопідйомного крана. Серед недоліків цього дослідження слід відзначити зневаження одним із найважливіших параметрів гальмування електродвигуном - втрати енергії, які для гальмування протиувімкненням велими високі і є його істотним недоліком.

У дослідженні [3] розглядається питання мінімізації середньоквадратичного значення зусилля, що діє в головній балці мостового крана, під час переміщення вантажу в горизонтальній площині. Але також як і в попередній роботі розглянуто тільки процес пуску крана.

У науковій роботі [4] запропоновано стратегію генерування оптимальної форми командного профілю для зменшення залишкових вібрацій при маневрах крана з упору в упор. Використана методика ґрунтується на генеруванні в дискретному часі фазового профілю прискорення. Цей профіль враховує одночасні маневри пересування та підйому за наявності демпфування. Дискретний профіль прискорення будується аналітично за допомогою відрізків зі скінченним кроком.

У роботі [5] розглядають проблему небажаних коливань, спричинених рухами, керованими оператором. Ці коливання знижують можливі робочі швидкості та погіршують безпеку здвоєних кранів, що переміщують вантажі з розподіленою масою. Автори розробили новий метод прогнозування власної частоти здвоєних плоских кранів з різною довжиною кабелю. Крім того, запропоновано модифікований надчутливий (MEI) формувач вхідного сигналу для придушення коливань корисного вантажу у здвоєних кранах.

У статті [6] представлено загальну математичну

модель розімкнутого кінематичного ланцюга з допоміжними підланцюгами, застосовану для аналізу динаміки зразкового стрілового крана.

Математична модель була успішно перевірена за використанням комерційної програми MSC.Adams і програмного інтерфейсу ANSYS-MSC.Adams, а також оцінено вплив вищезгаданих факторів на поведінку вантажу і приводів крана за допомогою показників кінетичної енергії та позиціонування.

У дослідженні [7] запропоновано інформаційну систему, яка за допомогою чотирьох тестів дозволяє отримати залежності імпульсів від переміщення вагона по осі X та рейки по осі Y, а також залежності переміщення вагона та рейки від часу, результати яких продемонстровано.

У роботі [8] зроблено набір експериментів з керування в реальному часі, застосованих до нелінійної системи.

У дослідженні [9] проведено аналіз використання кранів для транспортування вантажу дуже поширене в будівництві. Наголошено, що переміщення вантажу за допомогою крана є непростим завданням, особливо коли необхідно дотриматись суворих специфікацій щодо кута повороту та часу переміщення вантажу.

У роботі [10] представлена динамічна модель 3D-крана, до якої застосовано методи штучного інтелекту синтезовано та застосовано до моделі методи штучного інтелекту: Fuzzy логічного керування (FLC) та адаптивної нейронної системи нечіткого виводу (ANFIS).

Система адаптивного нейронного нечіткого виводу (ANFIS) має на меті мінімізацію кутів повороту при збереженні опорної траєкторії у трьох осях. Реалізоване керування також було піддано тестуванню на стійкість до зовнішніх збурень.

У роботі [11] запропоновано новий дворівневий ієрархічний підхід до керування положенням візка та розгойдуванням вантажу мостового крана. На першому рівні досліджується проста математична модель маятника з урахуванням часової затримки через використання системи технічного зору.

У статті [12] описується лабораторний комплекс мостового крана, який використовується для дослідження принципів роботи сучасного асинхронного електроприводу та систем керування технологічними об'єктами. Він призначений для виконання лабораторних робіт студентами електромеханічних спеціальностей, а також для тестування наукових рішень, що стосуються електроприводів кранів. Комплекс реалізований на основі вбудованих систем. Основною метою є розробка рекомендацій щодо вдосконалення електромеханічної системи мостового крана з метою розширення її функціональності шляхом підвищення рівня автоматизації.

У роботі в процесі пересування проведено аналіз

існуючих підходів до вирішення проблеми та запропоновано новий підхід, який враховує зростаючу актуальність питань енергозбереження, впровадження антиперекісних технологій і, зокрема, систем керування. З іншого боку, він базується на використанні сучасних інформаційних технологій. Проведено математичне та експериментальне моделювання пружної моделі крана. Обговорюються перспективи подальшого застосування отриманих результатів.

Серед актуальних проблем та недоліків сучасних досліджень в галузі автоматичного керування електроприводом мостового крана слід виділити наступне: недостатньо враховуються реальні умови експлуатації, дослідження проводяться в лабораторних умовах, що ускладнює врахування всіх факторів, що впливають на роботу мостового крана в реальних промислових умовах; відсутність універсальності та адаптивності системи; алгоритми, які пропонуються дослідниками мають високу ефективність, але за певних умов, та не є універсальними для різних умов експлуатації. Крім того, системи керування часто вимагають точно налаштування цілого масиву параметрів, що в свою чергу, ускладнює введення їх в експлуатацію; численні дослідження не завжди в повній мірі приділяють увагу безпеці, при цьому техніка безпеки в експлуатації таких систем є ключовим аспектом; потребує окремого дослідження інтеграції системи запобігання зіткненням та інших безпекових заходів в існуючі або нові системи керування. Під час використання спрощених математичних моделей у дослідженнях не враховується безліч факторів, що потребує більш поглиблених досліджень та складніших моделей для адекватного відображення поведінки системи під дією зовнішніх факторів. Сучасні моделі та технології часто вимагають значних фінансових витрат на модернізацію наявного обладнання та впровадження нових систем керування, що не завжди є доцільним.

Отже, актуальним є розробка сучасних універсальних адаптивних систем керування електроприводом мостового крана, які будуть враховувати умови експлуатації, будуть більш безпечними, ефективними, економічними та потребуватимуть мінімум фінансових витрат на впровадження та модернізацію.

III. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи – розробка та дослідження адаптивної системи автоматичного керування електроприводом мостового крана, яка враховує пружні зв'язки та дозволяє підвищити точність позиціонування, стабільність, продуктивність системи та забезпечити ефективну роботу крана в промислових умовах.

Бажані результати: зменшення коливань вантажу під час руху та гальмування мостового крана; адаптація системи до змінних умов експлуатації; забезпечення стабільності під час роботи; підвищення точності позиціонування візка.

IV. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНУ

Мостовий кран представляє собою механізм, у якого в якості несучої конструкції виступає міст у вигляді з'єднаних між собою прогонових і кінцевих балок. На пролітній балці є простір для пересування вантажного візка (талі, тельфера), до якого кріпиться вантажозахоплювальний пристрій (звичайний гак, магнітний пристрій, грейфер тощо). Основний простір промислового майданчика не зайнятий під час використання мостового крана, оскільки візок переміщується підйомним механізмом по мосту над самим майданчиком, даючи змогу транспортувати вантаж на всій території, що обслуговується краном.

Мостовий кран (рис.1) має сталеву конструкцію 1, що спирається на ходові візки за допомогою механізму пересування 3. Відбувається переміщення по шляхах 2, які закріплено над площею. Вздовж моста крана прокладені рейки, на них переміщається візок за допомоги механізму пересування та підйомною лебідкою. Підйомна лебідка виконує функцію підйому та спуску вантажів.



1 – міст; 2 – шляхи; 3 – механізм пересування; 4 – візок; 5 – гак

Рисунок 1. Загальний вигляд та конструкція мостового крана

Сучасні мостові крани діляться за конструкцією таким чином:

- однобалочні: містять у собі двотаврову балку як основу, яка кріпиться до кінцевих балок;
- двобалочні: складаються з двох паралельних балок.

Електричний привод застосовується для переважної більшості мостових кранів усіх типів і призначень. Електричний привод застосовується для вантажопідйомних механізмів потужності від 0,2 до 300 кВт при живленні від мереж змінного трифазного струму напругою 380 В або мереж постійного струму напругою 220 В і 440 В [13]. Для особливо потужних кранових механізмів (потужністю понад 300 кВт) можливе живлення від трифазних мереж напругою 6-10 кВ.

Точність та надійність є головними визначальними факторами в управлінні електроприводом мостового крана. Найбільш розповсюджені алгоритми керування електроприводом включають прості методи, що засновані на класичній теорії управління, та

більш складні адаптивні інтелектуальні системи.

Дуже важливим в контексті забезпечення надійності, безпеки та точності є врахування пружних зв'язків в алгоритмах керування електроприводом мостового крана, оскільки саме пружні зв'язки мають вагомий вплив на динаміку системи, створюючи коливання на додаткові навантаження, які в кінцевому результаті можуть призвести до аварії, поломки або зношенню механізмів.

Алгоритми керування електроприводами в більшості є багатозадачними, мають функцію забезпечення швидкості, точності, замінюють дію висококваліфікованого персоналу.

Під час розроблення алгоритмів керування необхідним є врахування можливих змін параметрів системи (вага вантажу, довжина троса), питання практичної реалізації (максимальне прискорення та швидкість, величина керувального впливу і т.д.)

Класичне керування за відхиленням із послідовною і паралельною корекцією стало підставою для створення таких способів керування, як підпорядковане, векторне, адаптивне керування, які дають змогу забезпечити високі динамічні та регульовальні властивості [14].

Представляючи електропривод найпростішою структурною схемою на рис., необхідно пам'ятати, що неврахування пружних механічних зв'язків завжди тією чи іншою мірою спотворює фактичний характер процесів.

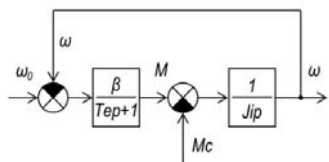


Рисунок 2. Структурна схема електроприводу з лінійною механічною характеристикою

Поряд з завданнями, для вирішення яких в конкретних умовах ці спотворення не мають істотного значення, є широке коло практичних питань, правильно розв'язати які без урахування пружностей неможливо. Під час вирішення завдань слід оцінювати пружні зв'язки на динаміку електромеханічної системи. Саме тому аналіз особливостей взаємодії електропривода з механізмом, що має пружні зв'язки в єдиній системі несе практичне значення [14].

Проведемо аналіз впливу пружних зв'язків за допомогою узагальненої структури електромеханічної системи, представленої на рис.3.

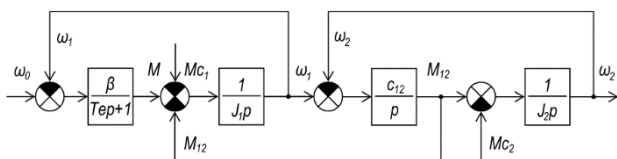


Рисунок 3. Структурна схема узагальненої системи електроприводу з двигуном, що має лінійну механічну характеристику

Для зручності аналізу процесів з управління покладемо $MC1=MC2=0$ і скористаємося перетвореною структурною схемою механічної частини.

Отримана таким чином структурна схема електроприводу з пружним зв'язком має вигляд:

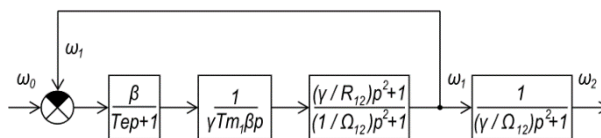


Рисунок 4. Перетворена структурна схема двомасової пружної системи

Передавальні функції механічної частини виражені через узагальнені параметри:

$$y, \Omega_{12} \text{ та } T_{m1} = J_1 / \beta \text{ при цьому } yT_{m1}\beta = J_{\Sigma} \quad (1)$$

Звертаючись до аналізу властивостей механічної частини, можна зробити висновок, що в структурі на рис. 3 механічна частина об'єкта являє собою консервативну коливальну ланку, у якій за $M=\text{const}$ механічні коливання, що виникли, за прийнятих припущень не затухають. Однак, розглядаючи схему на рис. 3, можна встановити, що коливання швидкості двигуна, завдяки наявності внутрішнього зворотного зв'язку за швидкістю в системі електроприводу, мають викликати коливання моменту, зумовлені динамічною жорсткістю механічної характеристики:

$$M(p) = -\beta\omega_1(p) / (1 + Tep) \quad (2)$$

За відсутності електромагнітної інерції ($T1=0$)

$$M = -\beta\omega_1 \quad (3)$$

За відсутності електромагнітної інерції двигун створює момент, що впливає на першу масу, аналогічний моменту в'язкого тертя.

Отже, електропривод завдяки наявності електромеханічного зв'язку чинить на коливання в механічній частині демпфувальну дію, аналогічну дії в'язкого тертя. Ступінь загасання коливань у консервативній механічній системі є кількісним показником демпфувальної здатності електропривода [15].

Передчасний вихід з ладу компонентів кранів і підкранових конструкцій зумовлений надмірно високими динамічними навантаженнями, особливо під час запуску, реверсу і гальмування. Це призводить до інтенсивного зношування проміжних валів, редукторів, муфт, металоконструкцій мостів, реборд ходових ко-

ліс, підкранових конструкцій і електродвигунів [16].

Основними чинниками, що впливають на величину динамічних навантажень, є: а) недосконалість системи керування електроприводами; б) наявність пружних елементів; в) зазори в кінематичних ланцюгах, зокрема в редукторах і між ребордами коліс та рейками; г) перекіс ферми моста.

Найефективніший спосіб зниження динамічних навантажень, а також підвищення довговічності механізмів пересування кранів і підкранових конструкцій полягає у модернізації існуючих електроприводів і впровадженні нових, які знижують різницю швидкостей обертання роторів двигунів. Система управління електроприводами пересування моста повинна бути адаптивною, з автоматичним підтриманням параметрів регульованих елементів на рівні, що мінімізує перекіс крана. У механічній частині необхідно знизити кутові зазори, замінивши наявні приводні вали на стандартні карданні. Використання демпфуючих властивостей електроприводів у поєднанні з підвищенням плавності навантаження механічної частини дозволяє формувати перехідні процеси без значних механічних коливань [17].

Урахування пружних зв'язків є критично важливим для стабільності, надійності, ефективності системи керування електроприводом мостового крана. Алгоритми керування різних сучасних систем керування електроприводом мають можливість враховувати пружні зв'язки, це значно знижує динамічні навантаження, мінімізує коливання, покращує продуктивність системи автоматичного керування.

V. АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

Серед сучасних систем автоматичного керування що враховує пружні зв'язки слід виділити адаптивну систему керування. Адаптивна система керування електроприводом мостового крана необхідна для забезпечення оптимальним функціоналом крана під час роботи в умовах змінних навантажень та зовнішніх впливів. Адаптивна система має здатність автоматичного налаштування параметрів керування в залежності від умов експлуатації, це в свою чергу дозволяє підвищити надійність та ефективність роботи мостового крана [18].

Серед особливостей адаптивної системи керування слід виділити:

- Система використовує датчики та алгоритми програмування, мета яких моніторинг стану крана, в тому числі навантаження, швидкість, температурні режими тощо.

- Під час збору даних система в автоматичному режимі реагує та коригує параметри керування електроприводом з метою забезпечення оптимальної роботи.

- Адаптивна система керування електроприводом враховує пружні зв'язки у механічній системі мостового крана, що дозволяє уникати резонансних

явищ, мінімізує вібрації під час руху крана.

- Система використовує інформацію, що поступає від дискретних давачів положення з метою точного визначення положення вантажу та подальшого налаштування алгоритмів керування відповідно поточному стану.

- Адаптивна система керування електроприводом мостового крана за допомоги оптимального керування електроприводом дозволяє зменшити енергоспоживання, і як наслідок витрати на експлуатацію мостового крана, також підвищується загальна безпека роботи та майже виключаються аварійні ситуації.

Таким чином, адаптивна система керування електроприводом мостового крана представляє собою важливий елемент сучасного мостового крана, який враховує пружні зв'язки, забезпечує економічну, ефективну та безпечну роботу в умовах динамічних навантажень, зовнішніх впливів [19].

Найбільш розповсюдженими з систем керування є системи з одним навантаженням. Для систем, які складаються з двох та більше навантажень, пропонуються традиційні методи керування.

Застосування адаптивної системи керування на основі нейронної мережі Radial basis function (RBF) для системи автоматичного керування електроприводом механізму пересування мостового крана є достатньо новою системою керування.

Новий контролер допомагає збалансувати візок та маятники під час роботи. Вплив невизначеності моделі регулюється адаптивним законом на основі нейронної мережі RBF. Дані системи мостового крана вимірюються за допомоги зворотного зв'язку на виході, це значно знижує витрати під час проектування обладнання [19]. Навчання мережі RBF складається зі збору даних про роботу крана, послідовну обробку цих даних з метою визначення оптимальних параметрів керування та постійне налаштування на основі змінних умов експлуатації. Навчання проходить шляхом зворотного зв'язку за допомоги алгоритмів машинного навчання.

Під час роботи механізму виникають коливання в його металоконструкціях і трансмісійних валах, а також розгойдування вантажу, який разом із канатом утворює маятник з рухомою точкою підвісу. Припустимо, що візок, маятник та вантаж працюють у двовимірній площині, при цьому візок рухається по горизонтальній лінії (рис.5).

Дану модель можна побудувати за допомогою метода Ньютона-Ейлера або Ейлера-Лагранжа.

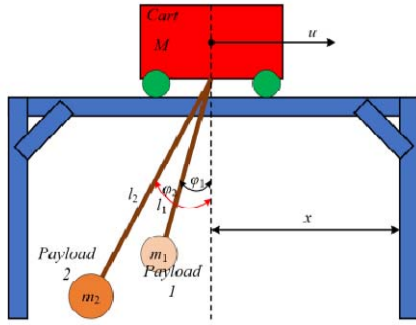


Рисунок 5. Модель простої системи мостового крана

де M - позначає масу візка;

m_1 - маса корисного вантажу 1;

l_1 - довжина кабелю між центром візка та вантажем 1;

φ_1 - кут повороту вантажу 1;

m_2 - маса вантажу 2;

l_2 - довжина кабелю між центром візка та вантажем 2;

φ_2 - кут повороту вантажу 2;

g - гравітаційна стала.

Користуючись формулою Ейлера – Лагранжа, яка базується на кінетичній та потенційній енергії, представимо рівняння у вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial p}{\partial q} = u, \quad (4)$$

де, L та P - це кінетична та потенційна енергія відповідно; q - узагальнена координата
 u - рушійна сила візка.

$$q = [x \ \varphi_1 \ \varphi_2]^T, \quad (5)$$

де x - положення візка, T - кінетична енергія

φ_1 та φ_2 - положення маятника 1 та маятника 2 відповідно відносно вертикальної осі.

Загальна потенційна енергія механічної системи записується як:

$$P = m_1 l_1 g (1 - \cos(\varphi_1(t))) + m_2 l_2 g (1 - \cos(\varphi_2(t))) \quad (6)$$

Загальна кінетична енергія механічної системи має вигляд:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \\ &= \frac{1}{2} m_1 ((l_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1)^2 + (\dot{x} - l_1 \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1)^2) \\ &+ \frac{1}{2} m_2 ((l_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2)^2 + (\dot{x} - l_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2)^2) \\ &+ \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

де, φ_1 - кутова швидкість вантажу 1;

φ_2 - кутова швидкість вантажу 2;

v_1 , v_2 - компоненти швидкості маятника в напрямках x і y , які обчислюються наступним чином:

$$\begin{aligned} v_1^2 &= (\dot{x} - l_1 \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1)^2 + (l_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1)^2 \\ v_2^2 &= (\dot{x} - l_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2)^2 + (l_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Нейронна мережа RBF в останній час достатньо популярна та привертає увагу науковців та дослідників. Завдяки тривірневій структурі, яка включає вхідний та вихідний шар, здатність до узагальнення, уникнення тривалих та непотрібних обчислень в порівнянні з багатошаровими мережами [20].

Даний адаптивний метод керування базується на нейронному наближенні з невідомими параметрами [21].

Визначення вектору помилки:

$$e(t) = \begin{bmatrix} x_1 - x_{ref} \\ x_3 - \varphi_{1ref} \\ x_5 - \varphi_{2ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_{ref} \\ \varphi_1 - \varphi_{1ref} \\ \varphi_2 - \varphi_{2ref} \end{bmatrix} = q - q_{ref} \quad (9)$$

де $q_{ref} = [x_{ref} \ \varphi_{1ref} \ \varphi_{2ref}]^T$, x_{ref} є бажаною позицією, а φ_{1ref} , φ_{2ref} є бажаними кутами повороту.

Закон керування має наступний вигляд:

$$u = \frac{1}{G(x)} [q_{ref} - F(X) + K^T e] \quad (10)$$

Структурна схема замкнутої системи керування представлено на рисунку 6 [22]. Якщо за основу береться відома система, тоді треба вказати чим запропонована у статті відрізняється від вказаної, інакше немає новизни.

Запропонований у статті регулятор забезпечує стабільну роботу для всіх виходів системи, при цьому адаптивність системи гарантовано під час зміни параметрів для відповідності реальним умовам експлуатації мостового крана.

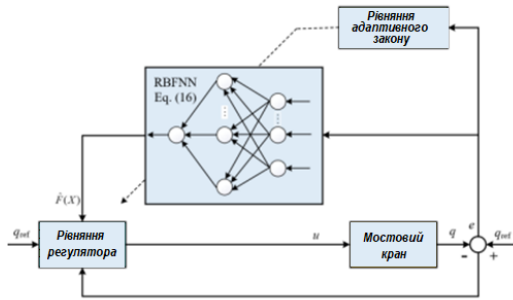


Рисунок 6. Структурна схема замкненої системи керування

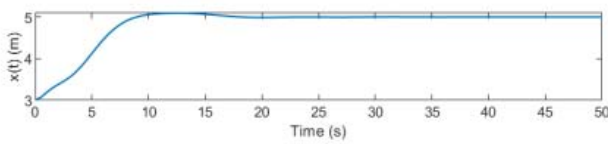


Рисунок 7. Положення візка за сценарієм 1 при $x = 5$

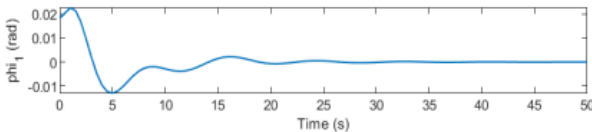


Рисунок 8. Кут повороту вантажу 1 за сценарієм 1

при $\varphi_1 = \pi/3$

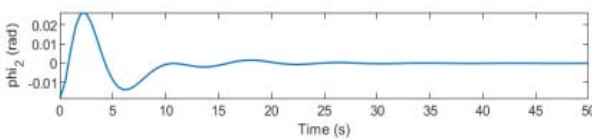


Рисунок 9. Кут повороту вантажу 2 за сценарієм 1

при $\varphi_2 = -\pi/3$

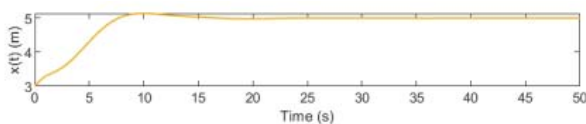


Рисунок 10. Положення візка за сценарієм 2 при $x = 5$

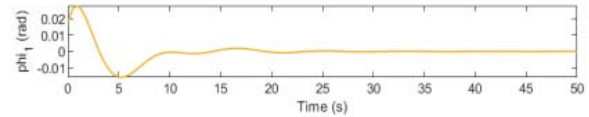


Рисунок 11. Кут повороту вантажу 1 за сценарієм 2

при $\varphi_1 = \pi/3$

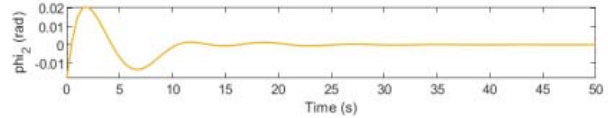


Рисунок 12. Кут повороту вантажу 2 за сценарієм 2

при $\varphi_2 = -\pi/3$

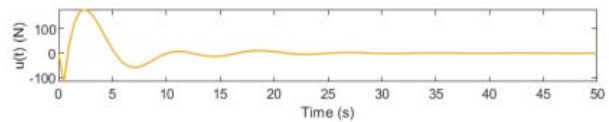


Рисунок 13. Вхідний сигнал керування за сценарієм 2

при $x = 5$

Сценарій 1: Параметри системи мостових кра-

нів становлять $M = 1000 (kg)$, $m_1 = 50 (kg)$, $m_2 = 100$

(kg) , $l_1 = 10 (m)$, $l_2 = 20 (m)$.

Сценарій 2: Параметри системи мостових кра-
 нів становлять $M = 100 (kg)$, $m_1 = 5 (kg)$, $m_2 = 10$
 (kg) , $l_1 = 1 (m)$, $l_2 = 2 (m)$.

Результати моделювання на рис. 7-13 показують, що запропонований регулятор стабілізує всі реакції системи мостового крана з високою ефективністю керування. Реакції на положення візка та кута повороту троса завжди відстежують задане значення з малим часом реакції.

На рисунку 6 представлено структурну схему з урахуванням пружних зв'язків між компонентами системи, в даній схемі представлена адаптивна система керування. На рисунку 7 представлено графік,

який демонструє динаміку руху візка при заданих координатах положення ($x=5$). При цьому відстежується траєкторія руху візка, враховано вплив адаптивного регулятора. Графік показує, що система швидко досягає стабільності з мінімальним часом відгуку [23].

Графік на рисунку 8 відображає кут повороту вантажу. За допомогою адаптивного методу керування система швидко стабілізує будь-які коливання вантажу, тим самим підтверджується висока ефективність запропонованої системи. Графік на рисунку 9 показує аналогічні з рисунком 8 результати, тільки за іншим сценарієм, тут коливання достатньо ефективно гасяться адаптивною системою керування. На рисунку 10 представлено результат сценарію, коли система продовжує стабільне відстеження траєкторії візка. Рисунки 11, 12 відображають динаміку кутів повороту вантажів за іншими сценаріями, при цьому система знову зберігає високу стабільність. Графік рисунку 13 демонструє поведінку вхідного керуючого сигналу, що стабільно має регуляційний вплив на позицію візка та вантажу.

Адаптивність регулятора визначається відношенням до зміни параметрів системи мостового крана. Зазвичай обсяг навантаження дуже різноманітний і залежить від кожної окремої умови експлуатації. Змінюючи масу вантажу і довжину кабелю, ми отримуємо реакцію системи як показано на рисунках 11-13 [24].

Результати, отримані з регулятором, що використовує RBF нейронну мережу (перерегулювання 0,217%), показують, що якість системи покращується з точки зору перерегулювання. Крім того, контролери на основі нечіткої логіки мають недолік, оскільки вони залежать від розуміння об'єкта експертом [25].

Запропонований регулятор є стійким для всіх виходів системи: положення візка і кут повороту троса точно відстежують бажані значення, а коливання вантажу повністю демпфуються. Адаптивність системи гарантується при зміні параметрів системи відповідно до реальних умов роботи крана.

VI. ВИСНОВКИ

В роботі вирішувалось завдання дослідження та розробки адаптивної системи управління електроприводом мостового крана, що враховує пружні зв'язки. Моделювання було проведено для типового мостового крана, в якому використовується асинхронний двигун. При цьому сценарії тестувались за умов різного навантаження з метою оцінки роботи системи в змінних умовах, тим самим дані умови були наближені до реальних експлуатаційних умов.

Запропонована система дозволяє підвищити точність, стабільність роботи крана в умовах змінних динамічних навантажень. Інноваційний підхід керування дозволить покращити надійність системи, оптимізувати роботу мостового крана, знизити аварій-

ність.

Отримані результати моделювання свідчать про достатньо значне підвищення ефективності, стійкості та надійності системи керування мостовим краном завдяки використанню адаптивної системи. Якщо порівнювати з традиційними методами керування, в яких пружні зв'язки викликають коливання, нестабільність роботи, дана система достатньо ефективно стабілізує рух крана. На основі відомих методів розроблено математичну модель та структуру керування, яка враховує пружні зв'язки. Розглянута адаптивна система керування електроприводом мостового крана має перевагу серед інших існуючих систем завдяки надійності, безпеці, ефективності та оптимальності, оскільки може автоматично налаштувати параметри керування (динамічні навантаження, пружні зв'язки) в залежності від умов експлуатації, що дозволить підвищити надійність та ефективність роботи мостового крана.

Подальші дослідження слід зосередити на впровадженні інноваційних систем керування в умовах промисловості та врахуванні впливу різних зовнішніх факторів, таких, як механічні та вітрові навантаження, вібрації, температура, вологість тощо. Для забезпечення стійкості та ефективності системи керування врахування цих факторів критично важливе, оскільки має суттєвий вплив на надійність, точність та довговічність роботи електроприводу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Видмиш А. А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с.
- [2] Збітнєв П.В., Будіков Л.Ю., Асєєв А.М. Про формування процесів гальмування мостових кранів. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2013. №6 (195), ч. 2. С. 110-115.
- [3] Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динамічна оптимізація режиму руху кранового механізму переміщення. Підйомно-транспортна техніка, 2013. №3. С. 5-21.
- [4] Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N. Dynamics and control of cranes: A review. Journal of Vibration and Control, 2003. № 9(7). P. 863-908.
- [5] Zhao, X., & Huang, J. Distributed-mass payload dynamics and control of dual cranes undergoing planar motions. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019. 126. P. 636-648.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.032>
- [6] Sun, Z., Bi, Y., Zhao, X., Sun, Z., Ying, C., Tan, S. Type-2 fuzzy sliding mode anti-swing controller design and optimization for overhead crane, 2018.
URL: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2869217>
- [7] Wang, T., Tan, N., Zhang, X., et al. A time-varying sliding mode control method for distributed-mass double pendulum bridge crane with variable

- parameters, 2021.
URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3079303>
- [8] Fihakhir, A. M., & Guerbouz, A. Intelligent control of industrial gantry crane model "3D Crane". International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), 2022. 10(10). URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [9] Wahyudi, Jalani, J., Muhida, R., & Salami, M. J. E. Control Strategy for Automatic Gantry Crane Systems: A Practical and Intelligent Approach. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2007. 4(4). URL: https://www.academia.edu/8900563/Control_Strategy_for_Automatic_Gantry_Crane_Systems_A_Practical_and_Intelligent_Approach
- [10] Abdullahi, A. M., Mohamed, Z., Selamat, H., Pota, H. R., Zainal Abidin, M. S., Ismail, F. S., & Haruna, A. Adaptive output-based command shaping for sway control of a 3D overhead crane with payload hoisting and wind disturbance, 2018. URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [11] Hmoumen, M., & Szabo, T. Controlling of payload swinging of an overhead crane. Robert Bosch Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, University of Miskolc, Egyetemvaros, H-3515, Miskolc, Hungary. Published online December 13, 2021.
- [12] Carlos, W., Leite, F., Costa, G.A., Castro, I.L., Franklin, E., Ferreira, M., Moura, J.P., Viana, J., & Neto, D.F. Event Discrete Control Strategy Design of Overhead Crane embedded in Programmable Logic Controller, 2018. URL: https://www.academia.edu/35670386/Event_Discrete_Control_Strategy_Design_of_Overhead_Crane_embedded_in_Programmable_Controller?uc-gsw=11138701
- [13] Ключем В.І. Теорія електроприводу: Навчальний посібник для ВНЗ, - 2-е вид. перероб. і доп. Енергоатоміздат, 2001. 704 с
- [14] Слепужніков Є.Д., Фідровська Н.М., Варченко І.С. Механізми пересування мостових кранів: монографія. Харків: НУЦЗУ, 2019. 124 с.
- [15] Воляннюк В.О. Підйомно-транспортні машини (системи): конспект лекцій Ч. 1. Київ. КНУБА, 2019. 144 с.
- [16] Тимошенко, Б. О., Філатов, С. Ю., Клімченков, А. Г., Івченков, М. В. Шляхи вдосконалення електромеханічної системи (ЕМС) мостового крану на підставі підвищення ступеню автоматизації Науковий вісник ДГМА, 2016. № 3 (21Е). С. 38. ISSN 2219-7869.
- [17] Alghanim, K. A., Alhazza, K. A., Masoud, Z. N. Discrete-time command profile for simultaneous travel and hoist maneuvers of overhead cranes. Journal of Sound and Vibration, 345, 2015. P. 47-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.01.042>
- [18] Anh, L. V., & Linh, V. T. T. Position Control and Anti-Sway of Overhead Crane System with Uncertain Nonlinear Model. Faculty of Electrical Engineering, University of Economics – Technology for Industries, Ha Noi 100000, Vietnam, 2023.
- [19] Chen, H., Fang, Y., Sun, N. A swing constraint guaranteed MPC algorithm for underactuated overhead cranes. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016. 21(5). P. 2543-2555. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2016.2558202>
- [20] Finch, J.W.; Giaouris, D. Controlled AC Electrical Drives. IEEE Trans. Ind. Electron. 2008, 55, P. 481–491. URL: <https://doi.org/10.1556/606.2021.00474>
- [21] Leite, D., Aguiar, C., Pereira, D., Souza, G., Škrjanc, I. Nonlinear fuzzy state-space modeling and LMI fuzzy control of overhead cranes. In 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), New Orleans, LA, USA, 2019. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858968>
- [22] Pimkumwong, N.; Wang, M.-S. Online Speed Estimation Using Artificial Neural Network for Speed Sensorless Direct Torque Control of Induction Motor based on Constant V/F Control Technique. Energies, 2018. 11, 2176.
- [23] Urbas, A., Augustynek, K., & Stadnicki, J. Dynamics analysis of a crane with consideration of a load geometry and a rope sling system. Journal of Sound and Vibration, 2024. 572, 118133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118133>
- [24] Wu, X., Xu, K., Lei, M., He, X. Disturbance-compensation-based continuous sliding mode control for overhead cranes with disturbances. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020. 17(4). P. 2182-2189. URL: <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3015870>
- [25] Yang, C., Du, C., Liao, L. Design and implementation of finite time sliding mode controller for fuzzy overhead crane system. ISA Transactions, 2022. 124. P. 374-385. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.11.037>

Стаття надійшла до редакції 20.08.2024

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE ELECTRIC DRIVE OF AN OVERHEAD CRANE CONSIDERING ELASTIC CONNECTIONS

OLIEINIKOV M. PhD student, Electric drive and automation of industrial equipment department of the

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: olieinikov.m@gmail.com. ORCID: 0000-0001-5999-5733;

Purpose. Investigation of the peculiarities of the automatic control system of an overhead crane electric drive with regard to elastic connections..

Research methods. To achieve this goal, we used the methods of system analysis and modeling with the help of software tools. This made it possible to reflect accurately the processes occurring in the system, as well as to test various operating scenarios and their impact on the overall system efficiency.

Results. The study considered the automatic control system of the electric drive and the importance of taking into account elastic connections. The proposed adaptive system uses the RBF neural network. The use of the proposed controller ensures resistance to disturbing influences and allows to level the load oscillations. The adaptability of the system is ensured by changing the parameters (load, speed of movement of mechanisms, stiffness, positioning accuracy, etc.) to meet the operating conditions of the overhead crane. Thanks to this, the system is able to operate efficiently even under variable loads and external influences. Computer modeling of the proposed control system was carried out, which confirmed its effectiveness under various operating conditions.

Scientific novelty. This system provides damping of load oscillations and increases the crane positioning accuracy. This is achieved by comparing it with existing control methods according to various criteria. It is proposed to use an algorithm for adapting the parameters of the control system in real time (load, trolley speed, cable length, mechanism stiffness, etc.), which significantly improves (by 5-7% positioning accuracy, by 8-10% stability) the performance of the system. In addition, the study confirmed the ability of the system to adapt to different operating conditions (changed load, variations in travel speed, uneven external disturbances), ensuring the stability and reliability of its operation, which is especially important for ensuring continuous operation of the crane in industrial environments.

Practical value. The use of this system can increase the overhead crane productivity by 5-10% compared to traditional control systems. Implementing the system in an industrial environment will significantly improve the efficiency and safety of the crane, as well as reduce maintenance and repair costs. In addition, this system can be used to modernize existing cranes, which will extend their service life and improve their reliability. This opens up new opportunities to improve the efficiency of industrial processes associated with the use of overhead cranes and provides better working conditions for operators.

Keywords: crane mechanisms, overhead crane, electric drive, automatic control system, adaptive system, elastic connections.

REFERENCES

- [1] Vydymysh A. A., Yaroshenko L.V. Fundamentals of Electric Drives. Theory and Practice. Part 1. / Textbook. Vinnytsia: VNAU, 2020. 387 p.
- [2] Zbitniev P.V., Budikov L.Yu., Aseev A.M. On the formation of braking processes in bridge cranes. Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl, 2013. №6 (195), part 2. P. 110-115.
- [3] Loveykin V.S., Romasevich Yu.O. Dynamic optimization of the motion regime of the crane transfer mechanism. Lifting and Transport Equipment, 2013. №3. P. 5-21.
- [4] Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N. Dynamics and control of cranes: A review. Journal of Vibration and Control, 2003. № 9(7). P. 863-908.
- [5] Zhao, X., & Huang, J. Distributed-mass payload dynamics and control of dual cranes undergoing planar motions. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019. 126. P. 636-648. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.032>
- [6] Sun, Z., Bi, Y., Zhao, X., Sun, Z., Ying, C., Tan, S. Type-2 fuzzy sliding mode anti-swing controller design and optimization for overhead crane, 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2869217>
- [7] Wang, T., Tan, N., Zhang, X., et al. A time-varying sliding mode control method for distributed-mass double pendulum bridge crane with variable parameters, 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3079303>
- [8] Fihakhir, A. M., & Guerbouz, A. Intelligent control of industrial gantry crane model "3D Crane". International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), 2022. 10(10). URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [9] Wahyudi, Jalani, J., Muhida, R., & Salami, M. J. E. Control Strategy for Automatic Gantry Crane Systems: A Practical and Intelligent Approach. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2007. 4(4). URL: https://www.academia.edu/8900563/Control_Strategy_for_Automatic_Gantry_Crane_Systems_A_Practical_and_Intelligent_Approach

- [10] Abdullahi, A. M., Mohamed, Z., Selamat, H., Pota, H. R., Zainal Abidin, M. S., Ismail, F. S., & Haruna, A. Adaptive output-based command shaping for sway control of a 3D overhead crane with payload hoisting and wind disturbance, 2018. URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [11] Hmoumen, M., & Szabo, T. Controlling of payload swinging of an overhead crane. Robert Bosch Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, University of Miskolc, Egyetemvaros, H-3515, Miskolc, Hungary. Published online December 13, 2021.
- [12] Carlos, W., Leite, F., Costa, G.A., Castro, I.L., Franklin, E., Ferreira, M., Moura, J.P., Viana, J., & Neto, D.F. Event Discrete Control Strategy Design of Overhead Crane embedded in Programmable Logic Controller, 2018. URL: https://www.academia.edu/35670386/Event_Discrete_Control_Strategy_Design_of_Overhead_Crane_embedded_in_Programmable_Controller?uc-g-sw=11138701
- [13] Klyuchem V.I. Theory of Electric Drives: Textbook for Universities, - 2nd ed., revised and supplemented. Energoatomizdat, 2001. 704 p.
- [14] Slepuzhnikov Ye.D., Fidrovskaya N.M., Varchenko I.S. Mechanisms for moving bridge cranes: monograph. Kharkiv: NUTZU, 2019. 124 p.
- [15] Volyanyuk V.O. Lifting and Transport Machines (Systems): Lecture Notes Part 1. Kyiv: KNUCA, 2019. 144 p.
- [16] Timoshenko, B. O., Filatov, S. Yu., Klimchenkov, A. G., Ivchenkov, M. V. Ways to improve the electromechanical system (EMS) of a bridge crane based on increasing the degree of automation. Scientific Bulletin of DGMA, 2016. № 3 (21E). P. 38. ISSN 2219-7869.
- [17] Alghanim, K. A., Alhazza, K. A., Masoud, Z. N. Discrete-time command profile for simultaneous travel and hoist maneuvers of overhead cranes. Journal of Sound and Vibration, 345, 2015. P. 47-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.01.042>
- [18] Anh, L. V., & Linh, V. T. T. Position Control and Anti-Sway of Overhead Crane System with Uncertain Nonlinear Model. Faculty of Electrical Engineering, University of Economics – Technology for Industries, Ha Noi 100000, Vietnam, 2023.
- [19] Chen, H., Fang, Y., Sun, N. A swing constraint guaranteed MPC algorithm for underactuated overhead cranes. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016. 21(5). P. 2543-2555. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2016.2558202>
- [20] Finch, J.W.; Giaouris, D. Controlled AC Electrical Drives. IEEE Trans. Ind. Electron. 2008, 55, P. 481–491. URL: <https://doi.org/10.1556/606.2021.00474>
- [21] Leite, D., Aguiar, C., Pereira, D., Souza, G., Škrjanc, I. Nonlinear fuzzy state-space modeling and LMI fuzzy control of overhead cranes. In 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), New Orleans, LA, USA, 2019. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858968>
- [22] Pimkumwong, N.; Wang, M.-S. Online Speed Estimation Using Artificial Neural Network for Speed Sensorless Direct Torque Control of Induction Motor based on Constant V/F Control Technique. Energies, 2018. 11, 2176.
- [23] Urbas, A., Augustynek, K., & Stadnicki, J. Dynamics analysis of a crane with consideration of a load geometry and a rope sling system. Journal of Sound and Vibration, 2024. 572, 118133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118133>
- [24] Wu, X., Xu, K., Lei, M., He, X. Disturbance-compensation-based continuous sliding mode control for overhead cranes with disturbances. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020. 17(4). P. 2182-2189. URL: <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3015870>
- [25] Yang, C., Du, C., Liao, L. Design and implementation of finite time sliding mode controller for fuzzy over-head crane system. ISA Transactions, 2022. 124. P. 374-385. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.11.037>