

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Рижкова Олександра Михайловича «Динамічне керування приводами автоматизованого крана-маніпулятора», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Актуальність теми дисертації. Сучасні системи автоматизації технологічних установок повинні забезпечувати високі показники якості керування, продуктивності і енергетичної ефективності виконавчого електромеханічного обладнання. Важною складовою електромеханічного обладнання, що використовується на високотехнологічних установках в енергетичній, будівельній галузях виробництва є крани-маніпулятори. Більша частина кранів-маніпуляторів призначена для роботи разом з оператором. Для спрощення роботи оператора використовується часткова автоматизація, наприклад, для зменшення коливань підвісу та автоматичного спуску вантажу. В разі, коли необхідно позиціонувати вантаж з великою точністю та підвищити продуктивність, використовуються автоматизовані системи керування рухом крана. Автоматизоване переміщення вантажу передбачає побудову системи керування, замкнутої за положенням приводних механізмів крану-маніпулятора. Така система керування приводами крану-маніпулятора повинна мати динамічні характеристики, які гарантують відхилення реального положення вантажу від заданої траєкторії руху, що не перевищують встановлені значення у відповідності до вимог безпеки. В енергетичній галузі, зокрема на атомних електростанціях, використовуються крани-маніпулятори для транспортування спеціальних матеріалів, яке вимагає підвищеної точності позиціонування, що визначається умовами безпеки. Такі установки, наприклад, установки дезактивації металевих відходів, є унікальними і тому для проектування їх системи керування рухом неможливо застосовувати підходи, які зазвичай використовують для загальнопромислових кранів. На швидкодію та точність позиціонування робочого органу такого крану впливають невизначеність масо-інерційних характеристик вантажу, що транспортується, а також неідеальність конструкції механічної частини крана.

Саме тому дана дисертаційна робота, що присвячена вирішенню наукового завдання зі створення автоматизованої системи позиційного керування приводами крану-маніпулятору при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка забезпечить підвищення швидкодії та точності позиціонування вантажу крана в умовах

динамічної зміни характеристик навантаження та збурень є важливою та актуальною.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в рамках державної науково-дослідної роботи «ІНТЕХЕН-2» (ДР 0120U002125), а також науково-дослідної роботи «Розробити засоби регулювання напруги, струму і частоти для електротехнологій та систем безредукторних електроприводів з застосуванням методів інтелектуального керування» (шифр «База-П8», виконується згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 12.06.2018 р., протокол № 10, ДР 0119U001282), в яких здобувач виконував функції виконавця. Здобувач також був виконавцем госпдоговірної теми № 799-17 від 01.11.2017 р. «Моделювання електромеханічної системи крана-маніпулятора при динамічній зміні навантаження» та госпдоговірної теми № 361-18 від 01.09.2018 р. «Розробка алгоритмів автоматичного керування системами електроживлення установки УДМ шляхом моделювання прогнозних графіків зміни її навантаження» між Інститутом електродинаміки НАН України та науково-технічною фірмою «ТЕМС», результати яких були використані НТФ «ТЕМС» при створенні системи позиційного керування електроприводами мостового крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів на ДП «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» ВП «Рівненська атомна електростанція».

3. Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Дисертаційна робота є завершеною працею, в якій вирішено важливе наукове завдання зі створення автоматизованої системи позиційного керування приводами крану-маніпулятора при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка забезпечить підвищення швидкодії та точності позиціонування вантажу крана в умовах динамічної зміни характеристик навантаження та збурень є важливою та актуальною..

Дисертаційна робота викладена на 185 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 121 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 8 таблицями, 127 рисунками. Список використаних джерел містить 59 найменування.

У вступі обґрунтовано доцільність та актуальність роботи, відзначено зв'язок роботи з науковими програмами та планами, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення результатів роботи, зазначено особистий внесок здобувача в друкованих працях, наведено відомості про апробацію отриманих результатів і публікації.

У першому розділі проведено аналіз існуючих систем автоматичного керування електроприводами кранів, з якого випливає, що точність керування (позиціонування) в таких системах залежить: від точності відпрацювання кутового положення валу приводного двигуна, на якому встановлено давач положення, від впливу неідеальної кінематики системи, що потребує синхронізації приводів при переміщенні вантажу, від наявності коливань вантажу і динамічної зміни характеристик приводу і середовища, в яке цей вантаж опускають, та потребує відповідної компенсації змін навантаження і збурень при створенні нової системи автоматичного керування електроприводами крана-маніпулятора, який відпрацьовує технологічний процес у складі установки дезактивації радіоактивних металів. У більшості існуючих робіт використовуються спрощені рівняння руху крана чи розглядається переміщення окремих його частин, що пояснюється прагненням зменшити складність розрахунків. Для створення системи керування рухом крана-маніпулятора, який відпрацьовує технологічний процес у складі установки дезактивації радіоактивних металів, слід врахувати, що на швидкодію та точність позиціонування робочого органу такого крану впливають невизначеність масо-інерційних характеристик вантажу, що транспортується, а також неідеальність конструкції механічної частини крана. Тому є доцільним розробити універсальну віртуальну модель крана, яка дозволила б проводити аналіз статичних і динамічних режимів роботи приводних механізмів крану та викреслила б рішення проблеми оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу при переміщенні крану. Необхідно розробити математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів при переміщенні вантажу у технологічній ванні обмеженого об'єму з рідиною, враховуючи дію виштовхувальної сили та зміни рівня рідини у ванні при поступовому зануренні вантажу. Це дозволить синтезувати систему керування позиційним електроприводом вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, яка підвищить швидкодію і точність позиціонування вантажу крана.

У другому розділі розроблено та досліджено віртуальну модель крана-маніпулятора. Було проведено опробування та порівняння результатів моделювання моделі з результатами аналізу лінеаризованого математичного опису. Отримані результати дають змогу проводити моделювання мостових кранів для комплексів систем керування положенням. Розроблена у розділі структурна Simulink-модель вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора у складі комплексу переробки небезпечних відходів адекватно відображає такі

особливості технологічного процесу, як зміна моменту статичного опору та моменту інерції приводу при зануренні кошика з вантажем у розчин, миттєве зменшення швидкості кошика до нуля та відділення маси кошика від маси колони при досягненні кошиком дна ванни. Представлено нове рішення проблеми усунення коливань вантажу, який переміщується крановим механізмом поступального руху і підйомним пристроєм, отримане шляхом синтезу системи зі зворотним зв'язком по вектору стану і спостерігача стану Льюенбергера третього порядку на підставі лінеаризованої моделі зі змінними параметрами. Адаптація середньогеометричного кореня характеристичного полінома і коефіцієнтів регулятора стану до зміни довжини каната дозволяє зменшити амплітуду коливань вантажу при розгоні і гальмуванні візка, і ліквідувати їх на ділянці руху з постійною швидкістю і в цільовій точці. З наведених результатів можливо зробити висновок, що доцільно використовувати для приводу телескопічної колони крану-маніпулятора системи регулювання положення. При застосуванні в електроприводі вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора системи регулювання швидкості будь-яка похибка у розрахунку тахограми приводить до ривків при досягненні кошиком дна ванни (що призводить до розплескування дезактивууючого розчину та неприпустимого занурення телескопічної колони або її деталей у дезактивууючий розчин) чи до зависання кошика над дном та порушення процесу відокремлення кошика від колони.

У третьому розділі отримані результати моделювання системи скалярного керування замкненої за положенням показали присутність різниці швидкостей двигунів при розгоні візка, що може призвести до короткочасного пробуксовування однієї з пар коліс, що призводить до похибок переміщення. Кращі результати для скалярної системи показали стратегії керування «Master-Slave» та «Mean control», які мають високу швидкодію систем і точність позиціонування візка. Різниця швидкостей при таких стратегіях є невеликою і присутня лише при розгоні та гальмуванні, з чого можна дійти висновку, що фактично пробуксовування коліс є маловірогідним. При використанні системи векторного керування та двох перетворювачів частоти отримано результати з похибками, що свідчить про надзвичайно велику точність позиціонування, а також, з огляду на різницю швидкості двигунів, відсутність пробуксовування коліс. З огляду на результати моделювання видно, що можливо досягти прийнятних результатів, для поставлених вимог за рахунок одного перетворювача частоти, але при цьому використовувати інші стратегії керування. Розглянутий синтез задаючого пристрою дозволяє спростити налаштування регуляторів та дає можливість налаштування задатчика

положення окремо від електроприводу. Також виявлено, що нерівномірності розташування вантажу в кошику не впливають на якість керування системою. Запропонований задаючий пристрій, пропорційно-інтегральним регулятором швидкості та лінійним пропорційним регулятором положення задовольняє вимогам технологічного процесу і може бути рекомендована для вантажопідйомних пристроїв кранів-маніпуляторів.

У четвертому розділі розроблена автоматична система на базі програмовано логічних контролерів, в якій виконано програмну реалізацію розроблених алгоритмів керування автоматизованим краном-маніпулятором. Розроблена система з використанням спроектованих алгоритмів роботи цеху та крану забезпечує автоматичну роботу цеху дезактивації з мінімальною участю людини в процесі. Розроблені програмні засоби для практичної реалізації можуть бути використані при створенні автоматичних та автоматизованих кранів та використовуватись в промисловості. Результати виконаних в дисертації досліджень використані компанією ООО «НТФ Темс» в проекті для Рівненської атомної електростанції, що підтверджено відповідними актами. Дана система позитивно зарекомендувала себе при використанні і є дешевшою від зарубіжних аналогів.

Висновки до дисертаційної роботи містять тринадцять пунктів, які поетапно деталізують отримані у роботі результати.

Список використаної літератури складається із 59 найменувань, з яких біля 50 % становлять публікації за останні десять років.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій. Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень і висновків є достатнім та підтверджується проведенням комплексних досліджень із застосуванням відомих теоретичних та експериментальних методів, співпадінням теоретичних розробок з результатами комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи базуються на результатах вирішення наукового завдання зі створення автоматизованої системи позиційного керування приводами крану-маніпулятору при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів, яка забезпечить підвищення швидкодії та точності позиціонування вантажу крана в умовах динамічної зміни характеристик навантаження та збурень. Висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані коректністю постановки та розв'язання задач досліджень, застосуванням загальновідомих положень фундаментальних законів теорії електричних кіл і електромагнітних полів; методів класичної та сучасної теорії автоматичного

керування, в тому числі методів поліноміального синтезу систем з регуляторами та спостерігачами стану повного порядку, математичного моделювання та експериментальних досліджень для перевірки теоретичних положень і наукових результатів.

5. Достовірність та новизна висновків та рекомендацій. Достовірність результатів, отриманих аналітичними методами, підтверджується результатами математичного моделювання та експерименту. Достовірність висновків забезпечується коректною математичною постановкою важливого наукового завдання роботи. Одержані нові теоретичні та практичні результати, які у сукупності обумовили розв'язання зі створення автоматизованої системи позиційного керування приводами крана-маніпулятора при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів. Усі методи, що запропоновані в дисертаційній роботі обґрунтовані строгими математичними викладками і підтверджуються результатами моделювання на ЕОМ та експериментів. Результати досліджень, наукові положення і висновки дисертації пройшли ґрунтовну апробацію при обговоренні на науково-технічних конференціях і семінарах найвищого рівня.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні моделі електромеханічної приводної системи крана-маніпулятора при переміщенні вантажу з урахуванням залежності моменту навантаження, величина якого змінюється в процесі переміщення, що дає змогу врахувати динамічну зміну навантаження. Вдосконалено метод керування краном-маніпулятором для оптимального за швидкодією гасіння коливань вантажу при переміщенні крану з урахуванням зміни довжини каната, шляхом синтезу системи модального керування зі зворотним зв'язком за вектором стану і спостерігачем стану Люенбергера третього порядку, що дозволяє відновити кут відхилення вантажу від вертикалі та його кутову швидкість. Розроблено математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів, в якій враховано зміну моменту статичного навантаження, зумовлену дією виштовхувальної сили при зануренні вантажу у технологічну ванну обмеженого об'єму з рідиною, та зміну моменту інерції приводу після досягнення вантажем дна ванни. Вдосконалено метод керування положенням електропривода вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора, який підвищує швидкодію і точність позиціонування вантажу та полягає у синтезі системи позиційного керування з пристроєм завдання усталеного значення кутового положення, пропорційно-інтегральним регулятором швидкості та лінійним пропорційним регулятором положення.

6. Практичне значення одержаних результатів. В роботі отримані нові та важливі для практики результати, що дозволяють вирішувати широке коло актуальних завдань. Розроблена віртуальна модель електромеханічної системи крану-маніпулятора може бути використана для дослідження процесів переміщення вантажу при одночасній роботі моста, візка і вантажопідйомного пристрою любого іншого крана-маніпулятора. Використання запропонованих систем керування дозволяє виключити можливість переїзду чи недоїзду робочого органу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора при зануренні в технологічну ванну обмеженого об'єму з рідиною за рахунок розроблених методів керування та задатчиків положення. При цьому виключається використання складних механічних посадочних пристроїв для точного позиціонування. Розроблені методи та системи керування можуть бути використані для розробки нових методів частотного керування будь-якими іншими електроприводами спеціалізованих кранів-маніпуляторів. Основні положення дисертаційної роботи, зокрема моделі механічної системи крана-маніпулятора та алгоритми автоматичного керування електроприводами крана, були використані НТФ «ТЕМС» при створенні системи позиційного керування електроприводами мостового крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів на ДП «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» ВП «Рівненська атомна електростанція».

7. Повнота викладення результатів в опублікованих працях. Наукові результати дисертації повно відображені у 6 друкованих працях, з них 4 статті у фахових виданнях України, в т.ч. 2 статті у виданні, що входить до наукометричної бази даних Scopus, та 1 патент України на корисну модель.

Публікації повністю відображують зміст дисертації.

Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися і були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: на XXIV Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика 2017» (м. Київ, 2017 р.), XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2018 р.), а також на наукових семінарах відділів № 1 та № 7 Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ, 2016-2020 рр.).

9. Оформлення дисертації. Дисертація написані українською мовою. Стиль викладу матеріалів відповідає загальноприйнятому і має високий науково-професійний рівень. Оформлення дисертації відповідає чинним вимогам.

10. Зауваження до дисертаційної роботи:

1. Мета роботи та предмет дослідження не в повній мірі знайшли відображення у назві роботи.
2. Об'єкт дослідження – *«електромагнітні процеси в системах частотно-регульованого електроприводу»* не зовсім точно відображує процеси, що досліджуються. Точніше було вказати *«електромеханічні процеси...»*.
3. В роботі поставлено для вирішення вісім задач досліджень, що є забагато для дисертації доктора філософії, в якій зазвичай вирішується три-чотири задачі. Більш раціональним було б узагальнення декількох зв'язаних задач.
4. Висвітлення кожної задачі дослідження чітко не відображено у змісті роботи. Було б доцільним назву розділу чи підрозділу дисертації назвати та присвятити відповідній задачі дослідження.
5. Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи не підкріплено жодним кількісним показником.
6. У висновках дисертації не зовсім чітко відображено результати вирішення кожної з восьми задач дослідження. Вони розпорошені серед тринадцяти пунктів висновків.
7. При формулюванні пунктів наукової новизни результатів роботи не зовсім чітко вказано, чим вони відрізняються від існуючих та що це дає.
8. При складанні рівнянь математичної моделі механічної частини електромеханічної системи на основі рівняння Лагранжа 2-го роду доцільно було б використовувати не тільки кінетичну та потенціальну енергію, а й енергію дисипації, тим паче, що в роботі однією з задач є демпфірування коливань вантажу.
9. Присутні деякі незначні порушення правил оформлення дисертаційної роботи, орфографічні помилки, термінологічні неточності та русизми, наприклад, «хоздоговор» замість «госпдоговір», «швидкостю» замість «швидкістю», «сполучення» замість «з'єднання».

Зазначені зауваження не стосуються основних положень та результатів дисертаційної роботи, частина з них носить рекомендаційний характер, тому не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Висновок. Дисертаційна робота «Динамічне керування приводами автоматизованого крана-маніпулятора», що подана на здобуття ступеня доктора філософії, за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків,

змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пп. 9, 10, 11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167, а її автор Рижков Олександр Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з галузі знань 14 «Електрична інженерія».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри теоретичної
електротехніки Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»

Микола ОСТРОВЕРХОВ

Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО