РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., професора Кутового Юрія Миколайовича

на дисертаційну роботу **Бєляєва Олега Сергійовича**

«Синтез двомасової електромеханічної системи з нелінійним фрикційним навантаженням і квазінейрорегулятором»

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Аналіз дисертаційної роботи Бєляєва Олега Сергійовича на тему «Синтез двомасової електромеханічної системи з нелінійним фрикційним навантаженням і квазінейрорегулятором», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити комплексний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

1. **Актуальність теми та зв’язок з науковими планами і програмами**

Сучасні автоматизовані електроприводи широко застосовуються у промисловості, транспорті, технологічних процесах, де необхідно забезпечити належні показники регулювання рухом. Існує широкий клас електроприводів машин та механізмів (прокатні стани, магістральні та шахтні електровози, металорізальні верстати та ін.) у яких має місце проковзування або юз, і вони являють собою електромеханічну систему з нелінійним фрикційним навантаженням. Таке навантаження може мати так звану «падаючу» ділянку, на якій підвищення швидкості проковзування супроводжується зниженням коефіцієнта тертя. Це може призвести до розбіжного перехідного процесу і появи фрикційних автоколивань. У свою чергу це погіршує показники якості технологічного процесу, створює додаткові втрати енергії, знижує продуктивність, а в

окремих випадках можуть викликати навіть поламки кінематичних ланок. Таким чином, дослідження цих специфічних режимів, усунення фрикційних автоколивань і підвищення показників якості є актуальною задачею.

На кафедрі автоматизованих електромеханічних систем НТУ «ХПІ» у 2006 році було запропоновано регулятор, здатний усувати фрикційні автоколивання і забезпечувати необхідні показники регулювання – так званий квазінейрорегулятор (КНР). За структурою цей регулятор є спрощеною одношаровою нейронною мережею і працює при лінеаризованій ділянці характеристики тертя (із збереженням нелінійності «у великому»). Перевага такої структури – можливість для лінеаризованої ділянки тертя аналітичного розрахунку вагових коефіцієнтів регулятора замість багаточисельних ітераційних комп'ютерних розрахунків. З розвитком елементної бази (швидкодійні мікроконтролери, високоточні датчики) реалізація КНР у системах електропривода стала практично можливою, що додатково актуалізує дослідження в цьому напрямі. Розробка нових і вдосконалення існуючих методик синтезу квазінейрорегулятора для двомасових електромеханічних систем з пружним зв'язком і нелінійним фрикційним навантаженням, що усувають фрикційні автоколивання, є своєчасним і актуальним завданням.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана в рамках тематичного плану науково-дослідних робіт кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» і узгоджується з потребами підприємств, що ведуть розробку сучасних автоматизованих систем керування електроприводами («ФЕД», м. Харків).

3. Наукова новизна одержаних результатів

Дисертація містить наукову новизну, з найбільш суттєвих доробок роботи можна назвати:

- розробка у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах математичної моделі двомасової електромеханічної

системи з пружним кінематичним зв’язком, нелінійним фрикційним навантаженням та з квазінейрорегулятором;

- одержання аналітичних співвідношень для визначення меж стійкості системи в просторі модифікованих узагальнених безрозмірних параметрів, що дозволяє аналізувати стійкість досліджуваної системи при знаходженні робочої точки на падаючій ділянці характеристики тертя;
- виведення аналітичних формул для розрахунку вагових коефіцієнтів квазінейрорегулятора у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах, які забезпечують усунення фрикційних автоколивань та задані показники якості регулювання;
- створення комп’ютерної моделі у середовищі MATLAB/Simulink двомасової електромеханічної системи з нелінійним фрикційним навантаженням, лінеаризованим по характерним ділянкам, та з квазінейрорегулятором, синтезованим за запропонованою методикою;
- результати моделювання розімкнутої системи та замкнутої з розробленим КНР, які підтвердили адекватність теоретичних положень роботи.

Таким чином, автором отримано низку нових наукових результатів у галузі електричної інженерії.

4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Розроблені у роботі підходи та методики можуть бути використані при розробці сучасних автоматизованих електроприводів, які являють собою двомасову систему з пружним кінематичним зв’язком та нелінійним фрикційним навантаженням для усунення за допомогою КНР фрикційних автоколивань та забезпечення показників якості керування. За наданими автором документами (актами впровадження), основні положення дослідження використано:

- у ПАТ «ФЕД» (м. Харків) під час виконання науково-дослідних робіт з розробки сучасних автоматизованих електромеханічних систем;

- у освітньому процесі НТУ «ХПІ» – матеріали дисертації включено до навчальних програм кафедри АЕМС при підготовці фахівців, зокрема впроваджено спецкурс з квазінейрорегулювання у дисциплінах «Теорія електропривода» та «Динаміка електромеханічних систем». Це підтверджує практичну значущість отриманих результатів.

5. **Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором.** За результатами дослідження дисертаційної роботи за темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, серед них: 4 статті у фахових періодичних виданнях України (категорії «А» та «Б»), 1 стаття у закордонному науковому виданні та 3 публікації апробаційного характеру в збірниках матеріалів міжнародних конференцій. Кількість і рівень публікацій відповідають вимогам МОН України до здобувачів ступеня доктора філософії, а також демонструють, що результати дисертації пройшли необхідну перевірку шляхом рецензування і апробації. Зазначене вище дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають значення для підвищення стійкості та керованості електроприводів, схильних до автоколивань в галузі електричної інженерії.

6. **Аналіз змісту дисертації. Ступінь обгрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Дисертація Бєляєва О.С. є цілісною, завершеною науково-дослідною працею. Робота викладена українською мовою, містить анотацію українською та англійською мовами, вступ, п’ять розділів основного змісту, висновки, список використаних джерел та 2 додатки. Структура роботи є логічною і послідовною, усі розділи взаємопов’язані та підпорядковані досягненню мети дослідження.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – створенню методики синтезу двомасових електромеханічних

систем з пружним кінематичним зв’язком, нелінійним фрикційним навантаженням та із квазінейрорегулятором, яка забезпечує усунення фрикційних автоколивань і задані показники якості керування.

У вступі автор обґрунтовує вибір теми та її актуальність, визначає мету і завдання дослідження, формулює об’єкт та предмет дослідження, висвітлює наукову новизну, практичну значущість роботи, особистий внесок, апробацію результатів та наводить відомості про публікації.

Розділ 1 дисертації містить огляд літератури за темою дослідження і постановку задач. Проведено аналіз сучасного стану проблеми керування електроприводами з фрикційними навантаженням. Розглянуто основні типи систем автоматичного керування електроприводом, їх особливості, переваги та недоліки щодо забезпечення стійкості і якості регулювання. Автором сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи.

Розділ 2 присвячений розробці математичної моделі двомасової електромеханічної системи. Спочатку система описується в класичних фізичних координатах, а далі здійснюється перехід до модифікованих узагальнених безрозмірних параметрів. У розділі отримано аналітичні співвідношення для меж стійкості розімкненої системи при різних значеннях параметрів (використано метод D-розбиття на площині параметрів). Наведено графічні залежності, які ілюструють області стійкості та нестійкості. Ці результати є основою для подальшого синтезу регулятора, оскільки визначають умови, в яких система без спеціального керування є нестійкою через фрикційні коливання.

Розділ 3 містить теоретичне обґрунтування методу квазінейрорегулювання. В розділі представлено структуру квазінейрорегулятора. Автор пояснює фізичну суть цього підходу: регулятор побудовано за аналогією із штучною нейронною мережею, але зі спрощеною архітектурою, що усуває необхідність багаточисельних ітераційних комп’ютерних розрахунків вагових коефіцієнтів нейронної мережі. У розділі запропоновано метод визначення передатної функції

замкнутої системи як суми характеристичного поліному розімкнутої системи плюс деякий поліном-доповнення.

Розділ 4 присвячено синтезу системи з квазінейрорегулятором. На основі теоретичних положень попередніх розділів автор виводить аналітичні формули для розрахунку вагових коефіцієнтів КНР, для обчислення похідних якого використано метод кінцевих різниць. Автор надає методику синтезу двомасової електромеханічної системи з фрикційним навантаженням та КНР.

Розділ 5 має прикладний характер: у ньому здійснено комп'ютерне моделювання розробленої системи. Автор створив і описав імітаційну модель двомасового електропривода з квазінейрорегулятором у середовищі MATLAB/Simulink. Усі отримані в розділі результати узгоджуються з теоретичними висновками роботи, що підтверджує правильність проведеного синтезу регулятора. Таким чином, розроблений автором КНР верифіковано методами комп'ютерного моделювання.

У висновках дисертації підведено підсумок виконаної роботи. Зокрема, сформульовано основні наукові результати, що виносяться на захист, та показано, яким чином вирішено поставлені у вступі завдання. Висновки чітко відображають досягнення мети дослідження – усунення фрикційних автоколивань у двомасовій електромеханічній системі шляхом синтезу квазінейрорегулятора. Це свідчить про логічну завершеність дослідження і виконання автором усіх запланованих етапів.

Список використаних джерел, наведений після висновків, охоплює значне коло літератури з теми (90 найменувань). В ньому присутні як класичні праці з теорії електропривода, так і сучасні публікації. Це вказує на те, що здобувач опрацював і врахував у своєму дослідженні досвід попередників.

Додатки до дисертації містять матеріали, що підтверджують практичне впровадження результатів (копії актів про впровадження у ПАТ «ФЕД» та у навчальний процес НТУ «ХПІ»), а також повний перелік

публікацій автора за темою. Наявність таких документів підсилює практичну значущість роботи.

7.Достовірність отриманих результатів та висновків

Достовірність отриманих результатів зумовлена коректним використанням наукових положень сучасного математичного апарату теорії автоматичного керування, теорії стійкості, методів аналізу динамічних систем, а також комп'ютерним моделюванням обґрунтованих режимів руху та підтвердженням результатів комп'ютерного експеримента фізичної сутності досліджуваних процесів.

8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертація виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у чотирьох фахових статтях, однієї закордонної статті, а також дисертант активно приймав участь в українських та закордонних конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. При огляді наукових джерел за тематикою дисертації основна увага приділена працям вітчизняних авторів та загальновідомим підходам. Бажано було б глибше проаналізувати внесок закордонних дослідників у проблему керування електроприводами з фрикційними навантаженнями. Розгляд ширшого кола сучасних іноземних публікацій (США, ЄС, Японія тощо) дозволив би розширити науковий контекст роботи та зіставити запропонований підхід із світовими аналогами.

2. Автор обмежився комп'ютерним моделюванням для підтвердження ефективності розробленого регулятора. Проведення натурного

експерименту на реальному електроприводі (або на лабораторному стенді) з використанням синтезованого КНР значно підвищило б практичну цінність і переконливість отриманих результатів.

3. Запропонована структура квазінейрорегулятора орієнтована на зворотний зв'язок лише за однією координатою – швидкістю другої маси. Не проаналізовано, наскільки обмеження на кількість вимірюваних координат впливають на стабільність та точність регулювання

4. Чіткість термінології та позначень місцями потребує покращення. Деякі введені поняття (наприклад, «квазінейрорегулятор») не отримали в роботі достатньо однозначного визначення або розмежування з існуючими термінами, що може ускладнювати їх розуміння. Крім того, позначення у формулах і на рисунках іноді використовуються непослідовно, що утруднює однозначне сприйняття матеріалу.

5. Незначні зауваження стосуються оформлення: подекуди зустрічаються дрібні друкарські помилки та стилістичні неточності. Також бажано уніфікувати позначення деяких величин у тексті і на рисунках.

Зазначені зауваження не є принциповими і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Рівень виконання дисертації, глибина дослідження і значущість отриманих результатів свідчать про високий науковий та професійний рівень здобувача.

10. Висновки

Дисертаційна робота Бєляєва О.С. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 14 – «Електрична інженерія» та спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Бєляєва Олега Сергійовича «Синтез двомасової електромеханічної системи з нелінійним фрикційним навантаженням і квазінейрорегулятором» відповідає вимогам

6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Бєляєв Олег Сергійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент – кандидат технічних наук,
Професор кафедри автоматизованих
електромеханічних систем Юрій КУТОВИЙ

01.08.2025

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
Підпис
Засвідчую:
НАЧАЛЬНИК ВІДДІЛУ КАДРІВ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" * ВІДДІЛ КАДРІВ