

РЕЦЕНЗІЯ

к.т.н., доцента Єріцяна Багіша Хачиковича

на дисертаційну роботу Озулу Антона Борисовича

«Електромеханічна система регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзду з нахилом кузова»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Детальний аналіз дисертаційної роботи Озулу Антона Борисовича на тему «Електромеханічна система регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзду з нахилом кузова», 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 дисертаційної роботи

Сучасна залізнична система – це складна логістична мережа, що потребує покращення безпеки та підвищення швидкості перевезень. Ключову роль у цьому процесі відіграють ходові показники електропоїздів, які залежать від безлічі факторів, таких як тягова мережа, тяговий перетворювач, тяговий двигун, система керування, система охолодження, підвіска та інші.

Останні роки принесли значні досягнення в удосконаленні тягової системи перетворення електричної енергії. Вдосконалення як електричної, так і механічної частин, а також оптимізація параметрів системи керування за допомогою сучасних алгоритмів дозволяють підвищити енергоефективність електропоїздів. Тягові двигуни також зазнали конструктивних змін, а в деяких випадках були повністю замінені.

Одним із шляхів підвищення швидкості руху є використання електропоїздів з механізмами нахилу кузова. Така система дозволяє збільшити швидкість проходження кривих ділянок шляху без необхідності будівництва нової інфраструктури. Для реалізації функції нахилу кузова використовуються пневматичні, гідравлічні та електромеханічні системи, кожна з яких має свої переваги та недоліки.

Підвіска електропоїзда також відіграє важливу роль у покращенні динамічних характеристик. Впровадження електромеханічних амортизаторів, які рекуперують енергію від коливань, може додатково підвищити швидкість руху та спростити систему нахилу кузова. Енергія, отримана від амортизаторів, може бути використана для нахилу кузова або накопичена в спеціальних пристроях, що відкриває нові можливості для використання відновлюваної енергії в залізничному транспорті.

Однак, встановлення додаткових систем нахилу кузова та електромеханічних амортизаторів збільшує капітальні витрати на виробництво електропоїздів та підвищує навантаження на візки. Тому актуальним завданням є розробка сучасних систем нахилу кузова, які одночасно можуть виконувати функцію гасіння коливань кузова.

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

Дисертаційна робота відповідає планам науково-дослідних робіт кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування» в рамках науково-дослідної теми «Підвищення енергоефективності електрорухомого складу залізничного транспорту» №0122U201673, в якій здобувач був виконавцем частини розділу 2 «Електромеханічні амортизатори».

3. Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів дає змогу вирішити теоретичне практичне завдання щодо гасіння коливань кузова швидкісного електропоїзду та рекуперації енергії коливань.

Наукову новизну отриманих результатів засвідчують такі найбільш значущі наукові положення:

1. Вперше запропоновано використання електромеханічного амортизатора у складі ходової частини швидкісного електропоїзду для систем нахилу кузова, що дозволяє одночасно виконувати функції нахилу кузова та рекуперації енергії коливань, замінюючи традиційні пневматичні амортизатори. Без амортизатора кут нахилу кузова змінюється в межах від $-0,45^\circ$ до $+0,38^\circ$, а з його застосуванням цей діапазон скорочується та складає від $-0,2^\circ$ до $+0,2^\circ$, тобто вдвічі менше. Електромеханічний амортизатор здатен рекуперувати 84 Вт/год при коливаннях з амплітудою 5 мм та частотою 2 Гц.

2. Вперше запропоновано алгоритм керування нахилом кузова та рекуперацією коливань каскадного типу, алгоритм переключення режимів роботи електромеханічної системи регулювання коливань швидкісного електропоїзду з нахилом кузова. Запропоновано виконувати вимір кута нахилу за допомогою датчиків акселерометру та гіроскопу типу MEMS. Крім того, розроблено методику для розрахунку кутів, що забезпечує високу точність та стабільність вимірювань у динамічних умовах.

3. Вперше розроблено концептуальне прикладне рішення з реалізації блоку електроніки драйверу керування електромеханічною системою регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзду з нахилом кузова та блоку електроніки датчику кута нахилу, що включає інтеграцію сучасних мікроконтролерів для обробки сигналів та розробку спеціалізованого програмного забезпечення, яке забезпечує адаптивне керування амортизатором у режимі реального часу.

Наукова новизна в дисертаційній роботі здобувача узгоджується із завданням дослідження, що є складовими поставленої в дисертації мети, та характеризується високим рівнем теоретичної обґрунтованості.

4. Практичне значення наукових результатів.

Практичне значення наукових результатів полягає в тому, що розробка та впровадження електромеханічного амортизатора в системі нахилу кузова швидкісного електропоїзда дозволяє значно покращити стабільність і комфорт під час руху. Це забезпечує більш плавний нахил кузова, зменшуючи вплив коливань на пасажирів, що особливо важливо для швидкісних потягів.

Інтеграція узагальненої імітаційної моделі системи регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзда з нахилом кузова у процес проєктування і моделювання забезпечує точність і надійність розробки нових систем нахилу кузова.

Створення концептуальної системи керування нахилом кузова та рекуперації коливань, що базується на використанні мікроконтролера STM32F407 та МЕМС гіроскопа MPU-9250, сприяє впровадженню інноваційних рішень у транспортній індустрії. Це відкриває можливості для подальших досліджень і розробок у сфері швидкісних електропоїздів.

Результати досліджень використано при наукових дослідженнях за наступними плановими темами:

«Підвищення енергоефективності електрорухомого складу залізничного транспорту» (№ ДР 022U201673, 2023р.), участь здобувача – виконавець частини розділу 2 «Електромеханічні амортизатори».

Результати дисертаційної роботи впроваджені в Науково-виробничому підприємстві «СПЕЦЕЛЕКТРОМАШ», а також у навчальному процесі кафедри Електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХП» від.

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані здобувачем

Результати дисертації відображені у 4 публікаціях: з них 3 статей у наукових фахових виданнях України, та 1 – у виданні, що входить до

міжнародної наукометричної бази даних Scopus; 7 наукових публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів.

Зазначене вище дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота Озулу А. Б. є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають практичне значення для електричного транспорту.

6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації

Дисертаційна робота Озулу Антона Борисовича є завершеною науковою роботою, містить дві анотації – українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки.

Об'єктом дослідження є процес електромеханічного перетворення енергії в системі нахилу кузова при гасінні коливань кузова.

Предметом досліджень є електромеханічна система регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзду з нахилом кузова.

У *вступі* обґрунтовано актуальність обраної тематики, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, подано коротку характеристику результатів дослідження, ступінь їх апробації та публікації.

У *першому розділі* дисертації викладено аналіз існуючих рішень для систем нахилу кузова, який показав, що найпоширенішим приводом для нахилу кузова є гідравлічний. Описано недоліки цього приводу. З іншого боку, для демпфуючих систем на рухомому складі широко використовуються пневморесори. Розглянуто потенційне рішення для покращення характеристик ходової частини швидкісного електропоїзду – інтеграція функцій нахилу кузова та гасіння коливань в одну систему шляхом синтезу електромеханічного амортизатора.

Відповідно до аналізу існуючих електромеханічних пристроїв, автором обґрунтовано рішення застосування лінійного двигуна електромагнітного типу як пристрою для нахилу кузова та демпфуючою складовою, що дозволяє рекуперувати енергію коливань. Це може значно підвищити ефективність

системи та зменшити її складність. Обрано напрями досліджень, поставлені основні задачі дисертаційної роботи.

У *другому розділі* автором запропоновано використання лінійного електромагнітного двигуна як оптимального рішення для реалізації системи нахилу кузова та демпфування коливань.

Побудована математична модель ходової частини електропоїзда з електромеханічними амортизаторами для оцінки ефективності роботи електромеханічного амортизатора. Вона враховує відсутність пневматичної частини. Модель включає рівняння руху та нахилу кузова, враховуючи електромеханічні характеристики.

Проведено розрахунок магнітного поля методом скінчених елементів для визначення оптимальних параметрів індуктивності (32,1-40,6 мГн) та інших характеристик. Отримано, що при максимальному робочому зазорі 70 мм магнітопровід не входить у режим насичення, забезпечуючи стабільну роботу амортизатора.

У *розділі 3* побудована імітаційна модель електромеханічної системи регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзду з нахилом кузова. Отримані автором результати моделювання нахилу кузова показують, що електромеханічний амортизатор досягає заданого кута 5° за 2 секунди з відхиленням $\pm 0,2^\circ$ при підтримці кута. Отримані також результати моделювання гасіння коливань. Вони наступні: електромеханічний амортизатор ефективно гасить коливання і відновлює енергію. Без дії амортизатора кут нахилу кузова змінюється від $-0,45^\circ$ до $+0,38^\circ$, а після його впливу цей діапазон скорочується до $-0,2^\circ$ до $+0,2^\circ$. Електромеханічний амортизатор здатний рекуперувати 84 Вт/год при коливаннях з амплітудою 5 мм та частотою 2 Гц, при цьому електромагнітна сила на якорі становить 43 кН.

З отриманих результатів видно, що електромеханічний амортизатор ефективно гасить коливання та рекуперує енергію, що підтверджується осцилограмами.

У розділі 4 автором розглянуто ключові аспекти управління електромеханічною системою регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзду з нахилом кузова з використанням електромеханічних компонентів.

Розроблено алгоритм керування електромеханічним амортизатором, який використовує гіроскопи типу мікроелектромеханічної системи (МЕМС) для вимірювання кутів нахилу кузова та візка. Обрано модель МЕМС датчику MPU-9250 для використання в системі керування нахилом кузова електропоїзда, який забезпечує високу точність вимірювань. В якості основного мікроконтролера було обґрунтовано та обрано мікроконтролер STM32F407. При виборі силових ключів обрано IGBT транзистори моделі FF800R17KP4_B2, які забезпечують надійну роботу системи в умовах високих навантажень.

Розроблено електричну принципову схему драйвера керування (напівпровідникового перетворювача) електромеханічною системою, що включає блоки живлення, мікроконтролер, керування силовими ключами та вихідні роз'єми для підключення датчиків. Створена топологія друкованої плати (розмір 120 мм на 90 мм, двошарова, з розташуванням компонентів на одній стороні), що забезпечує зручність монтажу та обслуговування системи. Також розроблено електричну принципову блоку датчику типу МЕМС, яка має компактні габарити (розмір 25 мм на 25 мм, двошарова). Виконана база конфігурація ввідів/виводів мікроконтролера в програмному середовищі CubeMX.

Висновки, сформульовані у роботі, висвітлюють основні наукові та практичні результати, отримані здобувачем при вирішенні поставлених задач.

Перелік використаних джерел із 109 найменувань, що достатньою мірою відображає опрацювання здобувачем значної кількості літературних джерел за темою дисертаційної роботи.

Додатки містять список публікацій здобувача та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

7. Достовірність отриманих результатів та висновків

Достовірність результатів, отриманих у дисертації, підтверджено коректністю постановок математичних задач, відповідністю математичних моделей суті описуваних процесів та експериментальними дослідженнями, виконаними за допомогою імітаційних моделей.

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

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

Основні ідеї автора та результати досліджень викладено у необхідному обсязі у наукових фахових виданнях України, а також у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus; та пройшли ґрунтовну апробацію на українських та міжнародних наукових конференціях.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. При обговоренні кривої намагнічування електротехнічної сталі, яка зображена на рис. 2.9 не вказано значення індукції, яке є критичним (магнітопровід входить у режим насичення), що дуже важливо для оцінки ефективності роботи електромеханічного амортизатора.

2. На сторінки 6 ствердження «...пневматична система може бути менш ефективною через низьку щільність повітря» пропоную замінити на «..пневматична система може бути менш ефективною через неможливість забезпечити достатню щільність пневматичної системи». Щільність повітря можливо забезпечити відповідним тиском.

3. На сторінці 52 описано, що частота широтно-імпульсної модуляції 1-3 кГц вважається оптимальною, але недостатньо обґрунтовано саме цей діапазон частоти ШІМ.

4. У розділі 4 було представлено схеми електричні принципові драйверу керування, блоку датчику, але не було представлено загальної схеми електричної принципової електромеханічної системи, яка інтегрована у систему швидкісного електропоїзду

5. Відповідно до алгоритму керування електромеханічною системою, який представлено на рис. 2.9, при рекуперації коливань, електромеханічний амортизатор підключено до акумулюючої системи, але далі у роботі сама акумулююча система не описана.

Всі наведені недоліки аж ніяк не впливають на позитивну оцінку дисертації. Зауваження можуть бути предметом подальших досліджень автора.

10. Висновки

Вважаю, що дисертаційна робота Озулу Антона Борисовича «Електромеханічна система регулювання коливань кузова швидкісного електропоїзду з нахилом кузова» є завершеною науковою працею, яка містить низку нових, актуальних та достовірних результатів, що свідчать про її складність, систематичність та важливе значення для сфери електричної інженерії.

Тематика проведених досліджень за змістом повною мірою відповідає галузі знань 14 – Електрична інженерія та спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Дисертація повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії»,

затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022,
а її автор Озулу Антон Борисович, заслуговує присудження йому наукового
ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка.

Рецензент:

кандидат технічних наук,

доцент, доцент кафедри електричного

транспорту та тепловозобудування

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний університет»

Багіш ЄРІЦЯН

Підпис *доц. Багіша Єрїцяна*
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

25" 07 *М.І.Ю.І.*