

## ВІДГУК

офіційного опонента Жильцова Андрія Володимировича на дисертаційну роботу Бондаря Романа Петровича «Лінійні магнітоелектричні двигуни вібраційної дії для приводу будівельних машин і механізмів», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - «Електричні машини і апарати»

**Актуальність теми дисертації.** Ефективне застосування лінійних магнітоелектричних двигунів (ЛМД) у приводах вібраційних будівельних машин потребує вирішення низки теоретичних та практичних завдань, до яких слід віднести підвищення точності розрахунку електромагнітних параметрів, електромеханічних коливальних процесів, покращення ефективності проектування та розробки нових технічних рішень шляхом наукового обґрунтування оптимальних конструктивних параметрів двигунів, із урахуванням вимог їхнього застосування в будівельних технологічних процесах.

Традиційні математичні моделі ЛМД орієнтуються на застосування чисельних польових методів дослідження електромагнітних параметрів, а також колових методів розрахунку електромеханічних процесів із попередньо визначеними, на підставі польового аналізу, сталими параметрами схем заміщення. Такі моделі дозволяють провести розрахунок ЛМД як в усталених, так і перехідних режимах роботи. Водночас залишаються невизначеними питання впливу параметрів схеми заміщення на перебіг електромеханічних процесів двигуна в режимах роботи з випадковим характером навантаження або за необхідності реалізації негармонічних та неперіодичних режимів механічних коливань. У випадку, коли необхідно забезпечити широкий робочий частотний діапазон, важливою умовою ефективної роботи є дослідження електромеханічних резонансних властивостей ЛМД, що є відмінною особливістю електричних машин вібраційної дії. Розробка математичних моделей для дослідження зазначених

питань, дозволяє розширити галузі застосування ЛМД та їх ефективність, що обумовлює важливість та актуальність вирішеної науково-прикладної проблеми.

Основні результати дисертаційної роботи у вигляді розрахункових характеристик статичних та динамічних режимів, конструктивних рішень, були використані під час створення дослідних та робочих зразків ЛМД вібраційної дії, які застосовуються в приводах випробувальних вібраційних установок (Національний авіаційний університет), у процесах вібраційного занурення будівельних елементів (ТОВ «СКФ-БУД»), для сортування й орієнтування деталей та приготування штукатурних сумішей (НВП «Проммашсервіс»), а також у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури. Використання результатів роботи підтверджено відповідними актами впровадження.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.** Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій у дисертаційній роботі забезпечується коректним використанням відомих теоретичних положень, сучасних пакетів прикладних програм комп'ютерного моделювання, методик постановки експериментів та вимірювання електромеханічних характеристик, узгодженістю отриманих теоретичних результатів із експериментальними даними, апробацією результатів на наукових конференціях і семінарах та їх підтвердженням на практиці.

**Достовірність результатів досліджень.** Достовірність дисертаційної роботи обумовлена: коректною постановкою математичних задач, які використовують стандартні процедури математичного аналізу та методи математичної фізики; відповідністю математичних моделей фізичним процесам, які відбуваються у лінійних магнітоелектричних двигунах. Отримані теоретичні результати перевірені методом порівняння з експериментальними даними, що є підтвердженням обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у

дисертаційній роботі. Результати роботи були використані під час створення дослідних і макетних зразків ЛМД вібраційної дії для приводу будівельних машин і механізмів.

### **Основні нові наукові результати дисертації:**

1. Розвинуто теорію лінійних магнітоелектричних двигунів вібраційної дії шляхом врахування коливального руху якоря, широкого частотного діапазону, режиму механічного навантаження, що дало змогу науково обґрунтувати конструктивні принципи побудови та забезпечити ефективність конструктивних рішень на етапі проектування двигунів.

2. Розвинуто науковий підхід щодо визначення електромеханічних характеристик ЛМД вібраційної дії шляхом урахування закономірностей зміни параметрів схеми заміщення від робочої частоти, сили струму та режиму роботи, який ґрунтується на одночасному вирішенні польової та електричної задач і застосуванні еквівалентного комплексного механічного опору в рівнянні рівноваги напруг і забезпечує підвищення точності розрахунку електромеханічних коливальних процесів у широкому діапазоні зміни робочої частоти.

3. Уперше, за допомогою методу точкових відображень Пуанкаре, виявлено у лінійному магнітоелектричному двигуні електромеханічні коливальні процеси з хаотичною динамікою, а також визначено умови їхнього виникнення, що забезпечує розширення функціональних можливостей такого типу машин завдяки реалізації хаотичного режиму руху робочих органів будівельних машин та механізмів.

4. Розроблено нову коло-польову математичну модель лінійного магнітоелектричного двигуна вібраційної дії, яка, на відміну від наявних, суміщає розрахунок нестационарного електромагнітного поля в неоднорідному нелінійному провідному середовищі з висококоерцитивними постійними магнітами з одночасним розрахунком рівнянь електричного та механічного кіл, що дало можливість підвищити точність розрахунків електромеханічних коливальних процесів.

5. Розроблено мультифізичну математичну модель для аналізу теплових процесів у ЛМД вібраційної дії, що ґрунтується на теорії кіл, яка, на відміну від відомих, враховує взаємний зв'язок електромагнітних, механічних та теплових процесів у коливальному режимі роботи, що дає змогу прогнозувати електромеханічні та теплові характеристики двигуна як у перехідних, так і усталених режимах роботи.

**Значущість отриманих результатів для науки та практичного використання.** Наукове значення отриманих у дисертації результатів полягає в розвитку теорії ЛМД вібраційної дії в напрямі розробки нових та вдосконалення наявних математичних моделей, які враховують закономірності зміни параметрів схеми заміщення від робочої частоти, сили струму та режиму роботи, у науковому обґрунтуванні оптимальних конструктивних параметрів двигунів із урахуванням вимог їхнього застосування в будівельних технологічних процесах, у вдосконаленні підходів до визначення електромагнітних параметрів, електромеханічних коливальних характеристик та теплових показників ЛМД, що забезпечує вдосконалення конструкції та покращення ефективності двигунів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблені математичні моделі забезпечують підвищення точності розрахунку, ефективності проектування та розробки нових технічних рішень двигунів. Розроблено рекомендації щодо вибору структури та оптимальних конструктивних параметрів ЛМД вібраційної дії, використання яких на практиці дає змогу створювати будівельне обладнання, з такими двигунами в якості електричного приводу, що має покращені енергетичні характеристики, і забезпечує зменшення відношення потужності споживання до амплітуди сили інерції на 9...20% порівняно з наявними машинами.

**Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 28 наукових робіт, у тому числі 23 статті у наукових фахових виданнях, із яких 5 входять

до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 2 тези доповідей, 3 патенти України на корисну модель.

У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України щодо докторських дисертацій.

**Оцінка змісту дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота Бондаря Р.П. складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність роботи, показано її зв'язок із науковими програмами і темами, сформульовані мета і завдання дослідження, розкриті наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, показано особистий внесок здобувача у виконання дисертаційної роботи та її практична апробація.

В *першому розділі* проведено аналіз сучасного вібраційного обладнання та визначено, що ефективне застосування ЛМД у приводах вібраційних будівельних машин потребує вирішення комплексу теоретичних та практичних завдань, до яких належать підвищення точності розрахунку електромагнітних параметрів та електромеханічних коливальних процесів, покращення ефективності проектування та розробки нових технічних рішень за допомогою наукового обґрунтування оптимальних конструктивних параметрів двигунів із урахуванням вимог їхнього застосування в будівельних технологічних процесах.

У *другому розділі* запропоновано математичні моделі для розрахунку електромагнітних параметрів та електромеханічних процесів ЛМД, які можуть бути вирішені аналітично і які можуть застосовуватися на попередньому етапі проектування для отримання конструктивних параметрів машини та їхньої оптимізації. Отримано аналітичні вирази для розрахунку електромеханічних характеристик, що ґрунтуються на лінійній моделі ЛМД вібраційної дії. Науково обґрунтовано конструктивні принципи побудови ЛМД із урахуванням особливостей їхнього застосування в будівельних

машинах та механізмах із коливальним рухом робочого органу. Визначено оптимальні конструктивні співвідношення між заданою амплітудою коливань та полюсною поділкою, головними розмірами та потужністю машини, в залежності від робочої частоти та параметрів навантаження, за критерієм максимуму коефіцієнту корисної дії.

У *третьому розділі* проведено моделювання електромеханічних процесів ЛМД вібраційної дії. Запропоновано модель двигуна, яка на відміну від наявних, враховує залежність параметрів схеми заміщення від робочої частоти, сили струму та режиму роботи. Це дало змогу дослідити вплив вихрових струмів на параметри машини та забезпечити підвищення точності розрахунку електромеханічних коливальних процесів ЛМД у широкому діапазоні зміни робочої частоти. Представлено мультифізичну модель, що суміщає розрахунок нестационарного електромагнітного поля в неоднорідному нелінійному провідному середовищі з висококоерцитивними постійними магнітами, з одночасним розрахунком рівнянь електричного та механічного кіл. Застосування моделі дало змогу розрахувати електромеханічні характеристики ЛМД для навантаження пружно-в'язкого типу з урахуванням неінерційності електромагнітних параметрів схеми заміщення.

В *четвертому розділі* розглянуто застосування ЛМД у вібраційних будівельних системах із багатьма ступенями вільності. Представлено математичну модель та отримано аналітичні вирази для розрахунку електромеханічних характеристик двигуна у двомасовій вібраційній системі. За допомогою Simulink-моделі «ЛМД-віброплощадка» для ущільнення бетону визначено, що ККД двигуна і процесу в цілому є вищими на частоті другої головної форми коливань. Це відбувається внаслідок меншого струму і втрат двигуна та більшої швидкості якоря. Встановлено, що під час вібраційного занурення будівельної палі в ґрунт максимальний ККД процесу та мінімальне діюче значення струму двигуна відповідають частоті фазового механічного резонансу. Запропоновано застосування трьох лінійних

двигунів, що одночасно діють у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, що дозволяє формувати тривимірне вібраційне поле заданої конфігурації та підвищити ефективність будівельних технологічних процесів.

*У п'ятому розділі* проведено дослідження електромеханічних процесів ЛМД із віброударним режимом навантаження. Запропоновано моделі для розрахунку електромеханічних процесів ЛМД в одномасовій та двомасовій віброударних системах, що ґрунтуються на схемах заміщення із зосередженими параметрами. Показано, що в лінійному двигуні можливо реалізувати три динамічні режими роботи: періодичний, квазіперіодичний та хаотичний. Наявність нерегулярних коливальних процесів підтверджено теоретично, а також за допомогою експериментальних досліджень, проведених із застосуванням розробленої експериментальної установки. Проведено параметричне дослідження динамічних характеристик двигуна у хаотичному режимі роботи.

*В шостому розділі* проведено дослідження втрат та енергоефективності вібраційних ЛМД будівельних машин. За допомогою лінійної моделі ЛМД отримано вираз для розрахунку оптимальних параметрів пружно-в'язкого навантаження, за яких ефективність роботи машини є найвищою. За результатами проведеного дослідження визначено, що в робочому режимі відбувається суттєве збільшення магнітних втрат, порівняно з режимом короткого замикання, що зумовлено значним впливом МРС якоря на робочі процеси машини. Розроблено мультифізичну математичну модель для аналізу теплових процесів у лінійному магнітоелектричному двигуні вібраційної дії, що ґрунтується на теорії кіл, і враховує взаємний зв'язок електромагнітних, механічних та теплових процесів.

*У сьомому розділі* проведено розрахунково-експериментальні дослідження характеристик вібраційних лінійних магнітоелектричних машин у різних режимах роботи. Розроблено стенд для дослідження статичних тягових характеристик двигуна. Проведено дослідження електромеханічних процесів ЛМД в режимі генератора. Визначено еквівалентні параметри

навантажувальної машини на підставі чисельного розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів, а також виконано експериментальне дослідження за допомогою дослідного зразка машини. Отримано експериментальні електромеханічні характеристики ЛМД у трьох режимах роботи – сталого значення струму, сталих амплітуди та прискорення коливань. Показано, що для розрахунку електромеханічних характеристик залежно від параметрів навантаження, може використовуватися лінійна аналітична модель, що ґрунтується на схемі заміщення з постійними параметрами ЛМД.

*Висновки* до розділів і за результатами роботи сформульовані достатньо чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

*Список використаних джерел* охоплює як сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації, так і основоположні роботи тематики, що розглядається. Список складається з 265 найменувань.

Автореферат дисертації відображає її основний зміст та вказує на внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

**Щодо дисертаційної роботи можна зробити такі зауваження:**

1. У роботі наведено не повний огляд методів моделювання електромеханічних процесів у розглянутому класі електротехнічних пристроїв та не виявлені переваги того чи іншого методу. Потребує також пояснення, чому в дисертації не використовувався підхід, наведений на с. 67, який дозволяє використовувати для моделювання лінійного двигуна моделі відповідних обертових двигунів?

2. В дисертації, крім загальних рекомендацій, доцільно було б розглянути конкретний практичний випадок, щодо вибору основних геометричних розмірів магнітоелектричного лінійного двигуна для заданих параметрів технологічного коливального процесу (амплітуди коливань, робочої частоти та потужності) та виконати оцінку покращення ефективності досягнутої завдяки розробленим рекомендаціям.



3. Потребує пояснення яким чином в осесиметричній задачі, представленій у підрозділі 3.4, враховується наявність радіальних розрізів у масивних полюсах, адже розподіл магнітного поля в такому випадку має тривимірний характер.

4. В підрозділі 4.3 розглянуто задачу використання лінійного двигуна для занурення палі в ґрунт, причому зазначається, що «характеристики процесу суттєво залежать від частоти джерела живлення, механічних параметрів системи, та змінюються з глибиною занурення». У зв'язку з цим потребує пояснення як мають змінюватись електромеханічні параметри цієї системи та обиратись конструктивні параметри двигуна, для забезпечення найбільшої ефективності впродовж усього процесу занурення.

5. Модель для розрахунку теплових процесів ЛМД у коливальному режимі роботи, що представлена у підрозділі 6.1, використовує схему заміщення на основі еквівалентних кіл із зосередженими параметрами. При цьому теплові показники визначаються як усереднені в об'ємі елементів двигуна – обмотки, магнітопроводів статора та якоря, корпусу. Але внаслідок неоднорідного розподілу температур в елементах двигуна, можуть виникнути локальні зони, в яких температура перевищуватиме допустиму.

6. У розділі 7 проведено експериментально-розрахункові дослідження електромеханічних характеристик магнітоелектричних машин у різних режимах роботи, серед яких, зокрема, розглядався режим генератора (п. 7.1.3). Необхідно обґрунтувати необхідність проведення такого дослідження і як це пов'язано з вирішенням завдань дисертаційної роботи.

Зазначені вище зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

## **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Бондаря Романа Петровича «Лінійні магнітоелектричні двигуни вібраційної дії для приводу будівельних машин і механізмів» є закінченою науковою роботою, в якій одержано нові науково

обґрунтовані результати, що у своїй сукупності розв'язують актуальну науково-прикладну проблему подальшого розвитку теорії лінійних магнітоелектричних двигунів вібраційної дії в напрямі розроблення нових та вдосконалення наявних математичних моделей, які враховують особливості будівельних технологічних процесів. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а її автор Бондар Роман Петрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – «Електричні машини і апарати».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій

Національного університету біоресурсів  
і природокористування України



А.В. Жильцов



26.10.2020

Пост. до СВР  
29.10.2020  
