

ВІДГУК

офіційного опонента Болюха Володимира Федоровича на дисертаційну роботу Бондаря Романа Петровича «Лінійні магнітоелектричні двигуни вібраційної дії для приводу будівельних машин і механізмів»,

що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - «Електричні машини і апарати»

Актуальність теми

Вібраційні технології є основою багатьох сучасних технологічних процесів. Зазвичай для реалізації зворотно-поступального руху застосовуються обертові двигуни, гідравлічні та пневматичні перетворювачі. Лінійні магнітоелектричні двигуни (ЛМД) є альтернативою традиційним приводам на основі двигунів обертання. На відміну від гідравлічних, пневматичних, інерційних та електромагнітних віброзбуджувачів, лінійні магнітоелектричні вібратори мають певні переваги внаслідок широкого частотного діапазону роботи, порівняно невеликої потужності споживання енергії, низького рівня шуму та хороших питомих показників електромагнітної сили. Але ефективне застосування ЛМД у приводах вібраційних будівельних машин потребує вирішення комплексу теоретичних та практичних завдань. Так залишаються невизначеними питання впливу параметрів схеми заміщення на характер протікання електромеханічних процесів двигуна в режимах роботи з нелінійним характером навантаження або за необхідності реалізації негармонічних та неперіодичних режимів механічних коливань. Важливою умовою ефективної роботи є дослідження електромеханічних резонансних властивостей ЛМД. Тому дослідження в цьому напрямі є актуальними і становлять науковий та практичний інтерес.

Актуальність роботи підтверджується науково-дослідними роботами «Розвиток теорії та дослідження електромеханічних комплексів, автоматизованих систем контролю технологічних процесів та якості конструкцій і споруд у будівельній галузі» (№ ДР 01060010010),

«Автоматизовані електромеханічні системи та вимірювальні комплекси» (№ ДР 0112U005112), «Розвиток теорії, розробка математичних моделей, дослідження динамічних процесів в електромеханічних системах будівельних машин та механізмів» (№ ДР 0115U005386), «Дослідження режимів роботи, розроблення вдосконалених математичних моделей електромеханічних систем технологічного обладнання та транспортних засобів будівництва» (№ ДР 0118U004934).

Основні результати дисертаційної роботи впроваджені в приводах випробувальних вібраційних установок (Національний авіаційний університет), в процесах вібраційного занурення будівельних елементів (ТОВ «СКФ-БУД»), для сортування й орієнтування деталей та приготування штукатурних сумішей під час виробництва надлегких термоізоляційних стінових панелей (НВП «Проммашсервіс»), а також у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури. Усі положення підтверджені відповідними актами впровадження.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій у дисертаційній роботі Бондаря Р.П. складається з: аналізу великої кількості науково-технічної літератури за темою дисертаційної роботи; коректної постановки мети і завдань дослідження; використання методів дослідження, які базуються на сучасному математичному апараті та новітніх програмних продуктах; критичного аналізу отриманих теоретичних даних і зіставлення їх з експериментальними результатами; коректного формулювання отриманих висновків.

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 Бондаря Р.П. були використані під час створення дослідних і макетних зразків ЛМД вібраційної дії для приводу будівельних машин і механізмів.

Основні нові наукові результати дисертації

1. Розвинута теорія ЛМД вібраційної дії шляхом врахування коливального руху якоря, широкого частотного діапазону, режиму механічного навантаження. Це дало змогу науково обґрунтувати конструктивні принципи та забезпечити ефективність конструктивних рішень на етапі проектування двигунів.
2. Розвинуто науковий підхід щодо визначення електромеханічних характеристик ЛМД вібраційної дії шляхом врахування закономірностей зміни параметрів схеми заміщення від робочої частоти, сили струму та режиму роботи. Цей підхід ґрунтується на одночасному вирішенні польової та електричної задач і застосуванні еквівалентного комплексного механічного опору в рівнянні рівноваги напруг.
3. Удосконалено аналітичну модель ЛМД вібраційної дії за допомогою апроксимації статичної залежності реактивної компоненти електромагнітної сили від переміщення. Це дало змогу отримати вираз для розрахунку оптимального значення фазового кута між електромагнітною силою та переміщенням якоря за критерієм максимуму механічної роботи впродовж періоду коливань.
4. Удосконалено математичну модель ЛМД при роботі в віброударній системі за допомогою врахування сили контактної взаємодії Герца. Це дало змогу дослідити динамічні характеристики двигуна, виникнення періодичного та квазіперіодичного режимів руху якоря.

5. За допомогою методу точкових відображень Пуанкаре виявлено коливальні процеси в ЛМД з хаотичною динамікою та визначено умови їх виникнення.
6. Розроблено мультифізичну математичну модель для аналізу теплових процесів у ЛМД вібраційної дії, яка враховує взаємний зв'язок електромагнітних, механічних та теплових процесів у коливальному режимі роботи.

Значущість отриманих результатів для науки та практичного використання

1. На базі розроблення нових та удосконалення існуючих математичних моделей ЛМД вібраційної дії розроблено рекомендації щодо вибору структури та оптимальних конструктивних параметрів двигунів, використання яких на практиці дає змогу розробляти будівельне обладнання, що має покращені енергетичні характеристики.
2. Запропоновано експериментально-розрахункову методику визначення електромагнітних параметрів та експлуатаційних характеристик, що дає змогу на практиці здійснювати раціональний вибір ЛМД для роботи в будівельних машинах, які використовуються для відповідних технологічних процесів.
3. На базі досліджень електромеханічних процесів ЛМД при роботі у вібраційному та віброударному режимах розроблено нове будівельне обладнання підвищеної ефективності, в якому здійснюються просторові, нерегулярні (хаотичні) та регулярні коливання, що чергуються з хаотичними для робочих органів.
4. Основні результати роботи 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 під час виробництва надлегких термоізоляційних стінових панелей (НВП

«Проммашсервіс»), а також у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури.

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 з 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 розвитку теорії та практики ЛМД вібраційної дії для будівельної галузі. Показано, що на сьогодні існує потреба у створенні надійного, ефективного та енергоощадного вібраційного обладнання, що особливо важливо для енергомістких технологій, де використовуються великогабаритні потужні машини, підвищення ефективності яких дає значний економічний ефект. Одним із можливих варіантів подолання наведених недоліків є застосування для приводу вібраційних машин магнітоелектричних двигунів.

В *другому розділі* проведено розрахунок електромагнітних параметрів та електромеханічних характеристик ЛМД вібраційної дії на основі аналітичних

моделей. Запропоновано низку математичних моделей для розрахунку електромагнітних параметрів та електромеханічних характеристик двигунів, які можуть бути вирішені аналітично, і які можуть застосовуватися на попередньому етапі проектування для отримання конструктивних параметрів машини, та (або) їх оптимізації.

В третьому розділі проведено моделювання електромеханічних процесів ЛМД вібраційної дії. Представлено Simulink-модель двигуна вібраційної дії, а також віртуальний стенд для отримання його робочих характеристик. Отримано робочі характеристики двигуна для двох типів навантаження – «сухе тертя» та «в'язке тертя». Представлено мультифізичну модель, що суміщає розрахунок нестационарного електромагнітного поля в неоднорідному нелінійному провідному середовищі з постійними магнітами, з одночасним розрахунком рівнянь електричного та механічного кіл.

В четвертому розділі розглянуті ЛМД у вібраційних будівельних системах із багатьма ступенями вільності. Представлено математичну модель та отримано аналітичні вирази для розрахунку електромеханічних характеристик двигуна приводу двомасової вібраційної системи. За допомогою Simulink-моделі «ЛМД-віброплощадка» для ущільнення бетону, визначено, що в такій системі є дві частоти механічного резонансу, коли амплітуда коливань і швидкість якоря та площадки набувають максимальних значень. 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 для підвищення ефективності будівельних технологічних процесів шляхом формування тривимірного вібраційного поля заданої конфігурації,

В п'ятому розділі розглянуті режими роботи ЛМД з віброударним типом навантаження. Запропоновано моделі для дослідження електромеханічних процесів двигуна в одномасовій та двомасовій віброударних системах. Показано, що дія ударного навантаження зумовлює виникнення асиметричних

режимів коливань, які характеризуються значними прискореннями робочого органу за невеликих значень частоти, а також розширення робочого частотного діапазону двигуна, підвищення максимального значення прискорення, та частоти на якій воно спостерігається. За допомогою методу точкових відображень та діаграм біфуркацій проведено параметричне дослідження динамічних характеристик двигуна у хаотичному режимі роботи.

В шостому розділі проведені дослідження втрат та енергоефективності лінійних вібраційних двигунів будівельних машин. Показано, що підвищення ефективності лінійних машин вібраційної дії може відбуватися як шляхом зменшення втрат в елементах машини та її привода, так і забезпеченням економічних режимів роботи, що мінімізують потужність споживання. Розроблено мультифізичну математичну модель для аналізу теплових процесів у ЛМД вібраційної дії, що враховує взаємний зв'язок електромагнітних, механічних та теплових процесів.

В сьомому розділі проведені результати розрахунково-експериментальних досліджень вібраційних лінійних магнітоелектричних машин. Представлено стенд для дослідження статичних тягових характеристик двигуна. Проведено дослідження електромеханічних характеристик двигуна у трьох режимах роботи – сталого значення струму, сталих амплітуди та прискорення коливань. Результати порівняльних розрахунків, проведених за допомогою аналітичної моделі, добре узгоджуються з експериментальними даними, отриманими за допомогою дослідного зразка двигуна та навантажувальної лінійної машини.

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.

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

Щодо дисертаційної роботи можна зробити такі зауваження

1. В дисертації багато разів зазначаються терміни «оптимальні співвідношення», «оптимальний зовнішній діаметр», «оптимальні параметри навантаження» та ін. Але ці показники характеризують локальні екстремуми і не враховують інші показники та параметри машини. Для докторської дисертації бажано провести глобальну оптимізацію з визначення основних параметрів вібраційних лінійних магнітоелектричних машин в залежності від умов функціонування.
2. В науковій новизні зазначається «ефективність конструктивних рішень на етапі проектування двигунів». Бажано пояснити за якими критеріями і в якій мірі оцінюється ця ефективність. На с. 140 написано «Проведений у попередніх підрозділах аналіз, дає змогу обґрунтувати конструктивні принципи побудови двигунів вібраційної дії». Бажано пояснити ці принципи і пояснити їх обґрунтування.
3. В дисертаційній роботі досить багато математичних моделей двигунів. При цьому виникає питання доцільності ряду математичних моделей з досить грубими припущеннями, наприклад на стор. 86, які потім усуваються. В розділі 2.1 зазначається, що розрахунок проводиться тільки на першій гармоніці. В результаті отримується висновок: «У ЛМД із невеликою кількістю полюсів, значення ширини полюса, визначене виразом (2.13), може відрізнятись від оптимального» (стор. 94). При синусоїдальній напрузі джерела живлення припускається, що і струм двигуна є синусоїдними, а параметри машини не залежать від режиму роботи (стор. 102). На стор. 125 написано «Дійсну електромагнітну силу замінимо гармонічною функцією». На цих припущеннях ґрунтується багато математичних викладок. А вже на стор. 129 зазначено, що «часові функції струму та електромагнітної сили значно відрізняються від синусоїдних». Більш того, на с. 138 вказано, що несинусоїдальність струму та інші нелінійні ефекти, можуть суттєво впливати на характеристики двигуна вібраційної дії (с. 138).

4. Деякі постановки, наприклад, «порівняльний розрахунок характеристик за лінійною та нелінійною моделями» (стор. 128) потребують додаткового пояснення. Як це узгоджується з висновками автора: «Результати розрахунку ККД, згідно з (2.33), мають достатню точність за невеликих значень струмів. Оскільки цей вираз не враховує залежність ККД від струму, то за умови збільшення останнього, вираз має невелику точність» (стор. 131). На с. 131 зазначені вирази для ненасиченої машини (с. 131). А як це узгоджується з реальною машиною?
5. Про перегляд аналітичних моделей з багатьма припущеннями говорить і сам автор: «Важливим є також розподіл магнітного поля активної зони машини, який дає інформацію про значення магнітного навантаження, що може бути використано для можливого перегляду попереднього аналітичного моделювання» (С. 156). На с. 294 написано: «Вираз (6.27) отримано за умови, що потужність магнітних втрат є незалежною від навантаження, хоча насправді це не так». Так навіщо такі викладки, які сам автор заперечує?
6. На с. 140 написано «допустиме магнітне навантаження матеріалу магнітопроводу» - це індукція насичення чи щось інше і чим воно визначається?
7. На с. 219 розглядаються рівняння динаміки механічної системи за трьома координатними осями між якими не враховуються зв'язки, тобто вони є незалежними. Можна було б розглядати одну координату, а інші враховувати аналогічно?
8. Про теплові показники. На стор. 99 написано, що «У короткочасному режимі, як зазвичай працюють вібратори, вплив температурних показників не такий суттєвий, як у тривалому». Але при цьому нічого не сказано про режим роботи і параметри навантаження, тому не зрозуміло чому зроблено такий висновок. Для розрахунку теплових процесів у лінійному магнітоелектричному двигуні використовуються схеми заміщення на основі еквівалентних кіл із зосередженими параметрами. Але при цьому виникають питання по розподілу температур в елементах двигуна та визначенню

найбільш нагрітої ділянки, що становить головну задачу для теплового розрахунку (с. 298). В той же час при експериментальних дослідженнях (с. 343) зазначається, що для покращення умов охолодження, а також для досягнення рівномірного розподілу температурного поля в об'ємі обмотки, зразки конструкційної сталі, під час випробування, занурювались у ванну з маслом. Але в теоретичних дослідженнях немає ніякої інформації про масляне охолодження та про розподіл температурного поля в об'ємі обмотки.

9. Як показує аналіз один розріз полюса якоря суттєво не впливає на вихровий струм. Див. статтю [Болюх В.Ф., Олексенко С.В. Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя //Вістник НТУ «ХП». Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. теорія і практика. – 2015. - № 13 (1122). - С. 45-60]. Бажано пояснити чому вибрано один, а не декілька розрізів і як при цьому змінюється розподіл вихрового струму, який не має осової симетрії. При наявності навіть одного розрізу полюса якоря математична модель має тримірний характер, але в розрахунках використовується двомірна математична модель (с. 286). Це вимагає пояснень.

10. В розділі 7 зазначається, що серед головних завдань експериментальних досліджень були:

- виявлення оптимальних та (або) номінальних режимів роботи двигуна;
- дослідження фізичних властивостей матеріалів, що застосовуються в конструкціях ЛМД вібраційної дії.

Виникають питання: 1) по визначенню як оптимального, так і номінального режимів роботи. 2) Навіщо проводити дослідження фізичних властивостей матеріалів? Необхідно обґрунтувати, чому цей етап досліджень є обов'язковим при проектуванні саме таких двигунів. Яким чином визначення властивостей матеріалів вирішує мету дисертаційної роботи?

11. Не зрозуміла необхідність досліджень по пружинам. Що тут оригінального в розрахунках? Мембранні пружини – це відомі пружини чи це нова пропозиція здобувача.
12. В п.3 висновків зазначено, що «Така конструкція дає змогу розвантажити магніти від інерційних сил інших частин якоря». Але в дисертаційній роботі ніякої інформації про інерційні сили немає.
13. Згідно з «Вимогами...»:
- Назва дисертації повинна вказувати на мету дисертаційного дослідження. Але з назви цього не видно.
 - Розмір основної частини (347 стор.) сильно виходить за межі вимог до докторських дисертацій (до 200 стор.). Слід було б вказати скільки повних сторінок займають рисунки і таблиць. Ці сторінки не входять до основної частини.
 - Список праць здобувача необхідно надавати за трьома рубриками: 1 - наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації; 2 - наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації; 3 - наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.
14. Граматичні похибки:
- «Розподіл втрат у магнітопроводі статора визначався на за допомогою виразів» (с. 295);
 - Рис. 5.14 представлений через зайву сторінку після його посилання;
 - На стор. 66 три коми зайві у фразі: «Із трьох загальних конфігурацій ЛМД, найбільше відповідає зазначеним умовам конфігурація з рухомими магнітами на якорі. Підвищення вібростійкості такої машини можливо досягти утопленням розташуванням магнітів між феромагнітними полюсами, та застосуванням циліндричної геометрії, яка забезпечує відсутність лобових частин обмотки. Живлення від однофазного джерела, робить машину відносно простою та надійною, зменшуючи також витрати на виготовлення».

Указані 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» за змістом відповідає паспорту спеціальності 05.09.01 - «Електричні машини і апарати». Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову проблему, суть якої полягає в розвитку теорії лінійних магнітоелектричних двигунів вібраційної дії шляхом розроблення нових та вдосконалення існуючих математичних моделей для розрахунку і аналізу електромагнітних параметрів та електромеханічних характеристик, які враховують особливості будівельних технологічних процесів. Дисертаційна робота відповідає вимогам п. п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а здобувач Бондар Роман Петрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - «Електричні машини і апарати».

Офіційний опонент,
професор кафедри загальної електротехніки
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
доктор технічних наук, професор
19.10.2020



Болюх В.Ф.

Підпис проф. Болюха В.Ф. засвідчую
Вчений секретар НТУ «ХПІ»,
доктор технічних наук, професор




Заковоротний О.Ю.

Трест. го СВР
23.10.2020
[Signature]