

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертацію
Бондара Романа Петровича
*"Лінійні магнітоелектричні двигуни вібраційної дії для приводу
будівельних машин і механізмів",*

яку представлено на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю
05.09.01 - електричні машини і апарати

У даний час вібраційні технології широко використовуються в процесі будівництва та при виробництві будівельних матеріалів. Реалізація таких технологій потребує наявності спеціальних будівельних машин і механізмів з високими техніко-економічними характеристиками. Тому їх розробці і удосконаленню приділяється значна увага. Одним з конкурентоспроможних технічних рішень щодо електроприводу таких машин є використання в їх складі лінійних магнітоелектричних двигунів (ЛМД) вібраційної дії, які мають ряд важливих експлуатаційних переваг. Але ефективне використання СМД потребує вирішення комплексу теоретичних та практичних завдань.

Тому, з огляду на вищезазначене, тема дисертація Бондара Р.П. є актуальною і присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми щодо подальшого розвитку теорії ЛМД вібраційної дії шляхом розробки і вдосконалення математичних моделей ЛМД та ефективних методів розрахунку й аналізу їх електромагнітних параметрів і електромеханічних характеристик, що дає змогу достовірно врахувати суттєві особливості функціонування ЛМД в складі приводу будівельних машин і механізмів. Зокрема врахувати вплив особливостей вібраційних будівельних технологій, які обумовлюють коливальний рух рухомої частини ЛМД, широкий діапазон робочих частот коливань, неперіодичний характер електромеханічних коливальних процесів, тощо.

Дослідження за темою дисертації проводилися у відповідності до планів робіт зареєстрованих державних НДР, що виконувалися на кафедрі електротехніки та електроприводу Київського національного університету будівництва і архітектури, в яких здобувач брав участь, як відповідальний виконавець.

Наукова новизна результатів дисертації.

У дисертаційній роботі набула подальшого розвитку теорія лінійних магнітоелектричних двигунів вібраційної та віброударної дії. Сукупність отриманих автором нових наукових результатів склала наукову основу для вдосконалення конструкцій та покращення ефективності зазначених двигунів з урахуванням особливостей функціонування будівельних машин і механізмів і відповідних будівельних технологій.

В дисертації розроблено ряд нових математичних моделей фізичних процесів, що відбуваються в ЛМД, а також удосконалено існуючі математичні моделі, які мають наукову новизну. Зокрема:

- Розроблено нову коло-польову математичну модель ЛМД вібраційної дії, яка дозволяє провести спільний аналіз нестационарного електромагнітного поля в ЛМД, електричний процес у колі обмотки статора та механічний процес коливального руху якоря, що забезпечило високу точність розрахунку характеристик електромеханічних коливальних процесів.

- Уперше розроблено мультифізичну математичну модель, що ґрунтується на теорії кіл і враховує взаємний зв'язок електромагнітних, механічних та теплових процесів у коливальному режимі роботи двигуна та дає можливість визначити його характеристики з урахуванням допустимого нагріву обмотки статора.

- Удосконалено аналітичну модель ЛМД вібраційної дії шляхом апроксимації залежності електромагнітної сили від переміщення поліномом третього порядку, що дало змогу визначити оптимальне значення фазового кута між електромагнітною силою та переміщенням якоря за критерієм максимуму механічної роботи впродовж періоду коливань.

- Удосконалено математичну модель електромеханічних процесів ЛМД у віброударній системі шляхом урахування сили контактної взаємодії Герца, що дало змогу визначити вплив ряду режимних факторів на виникнення періодичного та квазіперіодичного режимів коливань якоря.

Важливу наукову новизну мають результати, пов'язані з дослідженням складних електромеханічних коливальних процесів якоря ЛМД з хаотичною динамікою. В результаті проведеного аналізу визначено умови виникнення таких процесів, що забезпечує розширення функціональних можливостей будівельних машин та механізмів завдяки реалізації хаотичного режиму руху їх робочих органів.

Отримані теоретичні результати дозволили удосконалити науковий підхід до визначення електромеханічних характеристик ЛМД вібраційної дії шляхом врахування закономірностей зміни параметрів схеми заміщення ЛМД від робочої частоти, сили струму та режиму роботи.

Практичне значення отриманих в дисертації результатів полягає в:

- Розробці практичних рекомендацій щодо вибору структури та оптимальних конструктивних параметрів ЛМД вібраційної дії, які дозволяють створювати будівельне обладнання з покращеними, порівняно з існуючими машинами, енергетичними характеристиками.

- Важливе практичне значення мають розроблені спеціалізовані дослідні стенди та навантажувальне обладнання для дослідження електромеханічних процесів ЛМД вібраційної дії потужністю до 2 кВт та частотою коливання якоря в діапазоні 1...100 Гц і експериментально-розрахункова методика визначення електромагнітних параметрів та експлуатаційних характеристик ЛМД.

- Результати проведених в дисертації досліджень ЛМД при їх роботі у вібраційному та віброударному режимах та рекомендації щодо вибору їх оптимальних режимів роботи створюють практичну основу для створення нового будівельного обладнання підвищеної ефективності.

- Основні результати дисертаційної роботи впроваджені в ряді підприємств і установ при створенні зразків ЛМД вібраційної дії для виконання будівельних технологічних процесів, а також у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури про що свідчать наявні акти впровадження.

Достатній рівень обґрунтованості отриманих наукових результатів та висновків базується на строгості і коректності постановки задачі та виконанні математичних перетворень, використанні сучасних пакетів програм для математичного моделювання, оцінки достовірності результатів моделювання шляхом порівняльного аналізу розрахункових даних з результатами експериментальних досліджень.

Текстовий матеріал дисертації викладено в рукопису чітко без орфографічних і стилістичних помилок.

Основні результати дисертації опубліковано у 28 друкованих працях, з них 23 статті у фахових виданнях (11 статей опубліковано без співавторів і 11 статей опубліковано у виданнях, що включені до наукометричних баз даних Scopus і WoS), 3 патенти України на корисну модель, 2 тези в збірниках праць Міжнародних конференцій. Зміст цих публікацій відповідає темі дисертації, повністю відображає її основні положення та характеризує отримані наукові результати та висновки.

Автореферат у повній мірі відображає основні положення і результати дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційних досліджень неодноразово апробовано у доповідях на науково-технічних конференціях. Результати захищеної здобувачем кандидатської дисертації не містяться в представленій до захисту докторській дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 424 сторінках друкованого тексту, складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 344 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 17 таблицями та 174 рисунками. Список використаних джерел містить 265 найменувань із них 99 кирилицею та 166 латиницею.

Матеріал дисертації викладено у наступній послідовності.

У *вступі* коротко викладені основні параметри дисертації. Зокрема обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету наукових досліджень та завдання дисертації, описано пункти наукової новизни та практичне значення одержаних результатів і інш.

Важливе місце в дисертації займає *Розділ 1*, який міститься на 48 сторінках рукопису. В розділі докладно розглянуто проблеми застосування вібраційних технологій в будівництві, проведено аналіз типів, конструктивних особливостей та параметрів збудників вібрацій і, зокрема, лінійних магнітоелектричних двигунів (ЛМД), які у подальшому досліджуються в роботі. В першому розділі також проводиться аналітичний огляд різних підходів до математичного моделювання ЛМД та аналіз існуючих математичних моделей.

У *Розділі 2*, який за обсягом є найбільшим в дисертації (63 сторінки), розроблено ряд математичних моделей ЛМД, які можуть бути розв'язані

аналітичними методами, а результати розв'язання представлені у вигляді прикінцевих формул. Такий підхід дозволяє отримувати попередню інформацію щодо параметрів і характеристик ЛМД з малими витратами обчислювальних ресурсів, але вимагає прийняття ряду суттєвих припущень, які можуть в значній мірі впливати на достовірність результатів моделювання. Автор пропонує використовувати ці моделі на першому етапі проектування ЛМД з подальшим уточненням результатів за допомогою більш точних математичних моделей, які вирішуються чисельними методами.

У *Розділі 3*, який міститься на 42 сторінках, розроблено ряд математичних моделей ЛМД, які розв'язуються чисельними методами. В цих моделях ЛМД представлені заступними схемами, параметри яких знаходяться методами теорії поля з різними варіантами наближення (магнітостатичним, квазістаціонарним з урахуванням вихрових струмів в осерді). Розроблено модель, яка дозволяє розрахувати електромеханічні характеристики ЛМД шляхом спільного розв'язання рівнянь електромагнітного поля, рівняння електричного кола обмотки і рівняння механічних коливань якоря. Адекватність моделей доведена порівнянням розрахункових і експериментальних даних, отриманих на дослідному ЛМД.

У *Розділі 4*, який міститься на 36 сторінках, наведено математичні моделі і результати моделювання ЛМД у вібраційних будівельних системах із багатьма ступенями вільності коливань. Зокрема, двомасової вібраційної системи “ЛМД-віброплощадка”, тримасової вібраційної системи “ЛМД-паля-грунт”, а також багатовекторних вібраційних систем, які утворюють одночасні вібрації уздовж різних просторових напрямків. За результатами досліджень отримано висновки щодо оптимальних характеристик вібраційних процесів.

У *Розділі 5*, який міститься на 48 сторінках, розглянуто режими роботи ЛМД в складі віброударних будівельних машин, в яких наявність стадії удару в технологічному процесі суттєво впливає на характеристики приводу. Проведені дослідження виявили можливість реалізації в ЛМД трьох динамічних режимів роботи: періодичного, квазіперіодичного та хаотичного, здійснення яких залежить від величини зазору, потокозчеплення обмотки, амплітуди та частоти напруги живлення, а також електромеханічних параметрів системи.

У *Розділі 6*, який міститься на 27 сторінках, досліджено вплив втрат потужності в елементах конструкції ЛМД на показники їх енергоефективності.

У *Розділі 7*, який міститься на 50 сторінках, наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень вібраційних лінійних магнітоелектричних машин, проведених на розробленому автором стенді для досліджень статичних тягових характеристик ЛМД. Дано порівняння експериментальних і розрахункових даних, які підтверджують достатньо високу точність розроблених математичних моделей.

Серед зауважень по дисертації, необхідно виділити наступні.

1. Можливість ефективного використання магнітоелектричних двигунів в складі будівельних машин і механізмів вимагає дослідження і отримання позитивних висновків щодо достатньої механічної стійкості постійних магнітів до циклічних ударних і вібраційних навантажень, які виникають при роботі

потужних будівельних машин. Хоча ця проблема знаходиться в сфері матеріалознавства і виходить за рамки даної дисертації, але тільки позитивна відповідь уможливіє широке впровадження зазначених двигунів в будівельну галузь. З літературних джерел відомо, що різні типи і марки постійних магнітів (NdFeBr, SmCo, тощо) мають різну механічну міцність та стійкість до циклічних динамічних навантажень, а значить і різний ресурс експлуатації. Тому цей фактор також потрібно враховувати при виборі марки магнітів, конструктивного виконання рухомої частини двигунів та оцінки гранично допустимих динамічних навантажень, тощо. Нажаль такого огляду в дисертації не проведено.

2. З огляду на складність фізичних процесів в ЛМД з урахуванням їх змінного навантаження, особливостей електроживлення тощо, розробка варіантів ЛМД з оптимальними показниками є складним завданням і потребує обґрунтованих і узагальнених рекомендацій щодо оптимального вибору основних конструктивних параметрів і режимів роботи двигунів. За результатами проведених досліджень в дисертації надано окремі рекомендації щодо оптимального вибору певних параметрів ЛМД (наприклад, вибір співвідношення між шириною полюса якоря та полюсною поділкою, вибір зовнішнього діаметру активної зони двигуна, тощо). Але у цілому ці рекомендації не зведені в єдину систему, яка б мала чіткі ознаки системи проектування ЛМД і знайшла б загальне практичне використання.

3. При формулюванні аналітичних математичних моделей у другому розділі дисертації прийнято ряд припущень, які можуть впливати не тільки на чисельні результати, але й на порівняльні оцінки різних конструктивних варіантів виконання ЛМД. Наприклад, одним з припущень є припущення щодо відсутності магнітних потоків розсіювання постійних магнітів. Відомо, що основна складність адекватного розрахунку електричних машин з постійним магнітами полягає саме в точному урахуванні магнітних потоків розсіювання магнітів. В варіанті ЛМД, який показаний на рис. 2.1 б) дисертації і рис. 1 б) автореферату внаслідок виконання полюсів якоря зі шліцами і більш глибокого розташування постійних магнітів в пазах якоря їх потоки розсіювання будуть більшими, ніж в іншому варіанті а). Тому при однакових об'ємах постійних магнітів корисний магнітний потік взаємоіндукції в варіанті б) може бути меншим, ніж у варіанті а), що може вплинути на висновки щодо вибору кращого варіанта ЛМД навіть на першому етапі його проектування. Це питання вирішується лише при використанні польових математичних моделей, які строго враховують потоки розсіювання.

4. В дисертації для аналізу електромагнітного поля ЛМД з огляду на їх конфігурацію використовувалися лише осьосиметричні, тобто двовимірні польові моделі. Разом з тим в розділі 6 для зменшення втрат від вихрових струмів запропоновано виконання радіальних розрізів в кільцевих полюсах якоря, що спотворює характер розподілу поля в зоні полюсів, надаючи йому в загальному випадку тривимірний характер. В дисертації не описано, в який спосіб з використання яких додаткових умов було розраховано поле і втрати в такій конструкції з застосуванням лише двовимірної моделі поля.

5. При формулюванні окремих математичних моделей дисертант приймав різні припущення щодо залежності потокозчеплення обмотки статора ЛМД від переміщення якоря. Так, в формулі (1.8) прийнято припущення, що потокозчеплення та індуктивність обмотки статора ЛМД виражаються як синусні функції переміщення якоря. А при запису системи рівнянь (4.3) прийнято, що залежність потокозчеплення від переміщення виражається лінійною функцією. Такі припущення зроблені з урахуванням особливостей конструкцій і режимів роботи конкретних двигунів і дозволили спростити математичні записи моделей. Але з огляду на суттєвий вплив, який спричиняє зазначена залежність на показники ЛМД, доцільно було б оцінити і надати в дисертації інформацію щодо розрахункових похибок, викликаних зробленими припущеннями.

6. В Розділі 5 приведено цікаві результати моделювання хаотичних режимів коливань ЛМД, які не є періодичними і характеризуються нескінченною кількістю можливих траєкторій, широким частотним спектром та суттєвою чутливістю до початкових умов. Але в роботі немає опису за яких умов з використанням детермінованих математичних моделей, які описують періодичні коливальні процеси (наприклад, система рівнянь (5.9) в п. 5.3.3) розраховано неперіодичні стохастичні коливальні процеси. Надання короткого опису обчислювальних алгоритмів дозволило б остаточно переконатися в достовірності отриманих результатів.

7. За результатами досліджень в роботі доцільно було б дати прикінцеву більш розгорнуту порівняльну оцінку електроприводу будівельних машин на базі ЛМД з традиційними електроприводами на базі обертових електричних машин з точки зору принципів енергоефективності і енергозбереження, що у даний час є актуальним внаслідок удорожчання енергоресурсів.

8. В першому розділі при проведенні аналітичного огляду дисертант зробив спробу надати класифікацію лінійних машин, використавши лише 3 класифікаційні ознаки (плоский – коаксіальний, довгий статор – короткий статор, односторонній статор – двосторонній статор). Але з огляду на велике розмаїття лінійних машин різного типу, конструктивного виконання та призначення, така класифікація є незавершеною і тому не дає повного уявлення про клас лінійних електричних машин.

9. Слід відмітити, що текст дисертації, зокрема другий розділ (63 сторінки), дещо перевантажений докладними формульними викладками, що збільшило обсяг рукопису. Деякі з них без втрати інформативної змістовності матеріалу можна було опустити, що сприяло б більш зручному прочитанню рукопису дисертації.

Відзначені зауваження носять характер побажань автору при подальшій роботі й у цілому не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

Висновок. Дисертація Бондара Р.П є завершеною науковою працею, яка містить нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає в обґрунтуванні принципів побудови лінійних магнітоелектричних двигунів вібраційної дії, розвитку їх теорії та методів розрахунку електромагнітних параметрів, енергетичних характеристик та електромеханічних коливальних процесів, спрямованих на

підвищення ефективності їх роботи у складі електроприводу будівельних машин та механізмів.

Робота має важливе теоретичне значення для науки, вона вносить значний внесок в теорію лінійних магнітоелектричних двигунів вібраційної та віброударної дії і надає нові знання щодо фізичних процесів їх функціонування і впливу на характеристики цих процесів конструктивних параметрів і режимів роботи двигунів.

Результати досліджень використовуються на практиці і отримали позитивні оцінки фахівців. Висновки здобувача щодо значущості результатів його роботи для науки і практики є обґрунтованими. Результати дисертаційних досліджень у подальшому можуть бути використані підприємствами, науководослідними і проектними установами при розробці та впровадженні нових електропривідних систем будівельних машин і механізмів, які характеризуються високими техніко-економічними і експлуатаційними показниками.

Розглянута докторська дисертація повністю відповідає встановленим вимогам п. 10 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету міністрів України №567 від 24.07.2013 р. (зі змінами від 19.08.2015 р. № 656), які висуваються до докторських дисертацій, а її автор, **Бондар Роман Петрович**, заслуговує на присвоєння ученого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор, професор
кафедри електромеханіки Національного
технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"



Васьковський Ю.М.

Підпис Васьковського Ю.М. засвідчую

Вчений секретар Національного
технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"



Холявко В. В.

Пост. до СВР
26.10.2020
PH