

ВІДГУК

офіційного опонента Симоновського Віталія Іовича
на дисертаційну роботу Мартиненка Геннадія Юрійовича
**«Динаміка роторів турбомашин
в пасивних і активних магнітних підшипниках»**,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

1. Актуальність теми

Одним з найважливіших критеріїв працездатності і надійності експлуатації будь-якої роторної системи взагалі і турбомашини зокрема є рівень їх вібрації. Відомо, що високий рівень амплітуд вібрацій може призводити до виходу з ладу окремих вузлів машини або пошкодження всієї машини в цілому, що може супроводжуватися серйозними аваріями. Основним джерелом вібрації в турбомашинах, таких як компресори, детандери, насоси, генератори, завжди є власна незрівноваженість обертових елементів, а саме роторів. Тому необхідно забезпечувати мінімально можливий рівень вібрації ще на етапі конструювання роторної машини або при виборі її різних параметрів при введенні в експлуатацію.

У зв'язку з цим наукові дослідження, що дозволяють поліпшити якість моделювання роторної динаміки в турбомашинах є актуальними і практично цінними, так як дають можливість удосконалювати конструкцію з метою зменшення вібрацій розрахунковим шляхом.

Одним з найбільш нових підшипникових вузлів, які застосовуються в сучасній техніці є магнітні підшипники. Активні магнітні підшипники в Україні встановлюються, наприклад, в турбокомпресори газоперекачувальних агрегатів, вироблених ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання». Що ж стосується пасивних магнітних підшипників, то ці вузли знаходяться на стадії промислових розробок, і дослідного впровадження, хоча і існує безліч роторних систем з їх використанням. При цьому загальноприйнятого підходу до моделювання роторної динаміки з повноцінним урахуванням явищ і процесів внесених магнітними підшипниками не існує, що і породжує науково-прикладну проблему.

Виходячи з вищевикладеного на сьогоднішній день актуальними в даній області є дослідження, присвячені розробці нових узагальнюючих математичних моделей динаміки роторів в магнітних підвісах як реалізованих тільки за допомогою активних магнітних підшипників, так і в їх комбінації з пасивними магнітними підшипниками, з коректним урахуванням нелінійних взаємопов'язаних процесів електродинаміки, магнетизму і механіки. Такі моделі дозволять виробляти автоматизовані варіантні розрахунки по знаходженню параметрів роторних систем і машин, що забезпечують стійкість руху ротора в заданому діапазоні збурюючих навантажень. Крім того зважаючи на малу вивченість і, як наслідок, обмежену практичну застосовність, актуальним є і створення нових видів пасивних магніт-

них підшипників на основі уточнених методик розрахункового визначення їх силових і характеристик жорсткості.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках 6 науково-дослідних робіт, що фінансуються з державного бюджету за планами фундаментальних робіт МОН України та 2 договорів на створення науково-технічної продукції між НТУ «ХПІ» та ПАТ «Сумське НВО» (перелік надано в дисертації та авторефераті), а її результати впроваджені в промислово-виробничу практику, науково-дослідну діяльність та учбовий процес, що підтверджується дев'ятьма актами, виданими НТУ «ХПІ» та ПАТ «Сумське НВО».

2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи обумовлена тим, що вони засновані на фундаментальних рівняннях, підходах та методах теоретичної механіки, теорії коливань, математичного аналізу, теорії автоматичного управління, теорії стійкості, електротехніки, теорії оптимізації, а також числових методах, зокрема методі скінченних елементів, і методах експериментальних досліджень. Для досягнення мети досліджень та вирішення конкретних задач в роботі запропоновані оригінальні способи та методики, які є комбінацією відомих методів.

Достовірність підходів, способів, розрахункових моделей та результатів обумовлена та підтверджена узгодженістю отриманих розрахункових даних з даними власних експериментів та результатами інших авторів, відомими з відкритих джерел. Цими даними є вид форм власних коливань, значення власних частот, величин критичних швидкостей, резонансних частот та амплітуд тощо.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційних досліджень досягнуті за рахунок: детального аналізу об'єктів і процесів предметної області; системної постановки завдань досліджень у відповідності до визначених цілей; належного обґрунтування теоретичних положень, методик та засобів для вирішення кожної задачі; коректної постановки, повноти та послідовності виконання цих задач для досягнення кінцевих цілей; використання розроблених моделей та засобів імітаційного моделювання для отримання практичних результатів; підтвердження працездатності та точності запропонованих підходів, способів та методик; зрозумілої інтерпретації результатів експериментальних та розрахункових досліджень.

Практичний позитивний ефект від використання результатів та рекомендацій дисертаційної роботи в промисловості обумовлено їх використанням на провідному в Україні підприємстві машинобудівної галузі ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання». Декілька спільних наукових публікацій та патентів на винахід з фахівцями ПАТ «Сумське НВО» також свідчить про достовірність та застосовність вирішених задач в зазначеному напрямку сучасної проблематики важкої промисловості України.

Дисертаційна робота належним чином апробована, її основні положення та результати доповідались та обговорювались на багатьох міжнародних і всеукраїнських науково-практичних та науково-технічних конференціях і семінарах, в тому числі декількох закордонних.

3. Наукова новизна дисертаційної роботи

Аналізуючи зміст дисертаційної роботи, можна зробити наступні висновки щодо її наукової новизни:

– вперше запропоновано загальний підхід до моделювання лінійної та нелінійної динамічної поведінки роторів турбомашин з пасивними і активними магнітними підшипниками, який враховує низку особливостей таких систем, що роблять істотний вплив на роторну динаміку, та дозволяє усунути недоліки існуючих математичних моделей та засобів розрахунку;

– вперше запропоновано до використання при формуванні математичних моделей динаміки роторів в активних магнітних підшипниках новий підхід до опису їх магнітних кіл, що є експериментально підтвердженим, і таким що підвищує адекватність математичного моделювання за рахунок отримання виразів для магнітної енергії в залежності від механічних і електромагнітних змінних з урахуванням і без урахування опорів ділянок магнітних кіл, які мають достатню точність при нульових токах в обмотках електромагнітів та в межах геометрично можливих відхилень ротора в зазорі;

– вперше доведено суттєву нелінійність характеристик і необхідність врахування всіх узагальнених координат у виразах магнітної енергії кожного АМП для забезпечення тотожності реальним силовим характеристикам при їх застосуванні в математичних моделях динаміки роторів в активних магнітних підшипниках;

– вперше створено методику визначення силових характеристик пасивних магнітних підшипників на кільцевих постійних магнітах і активних магнітних підшипників з урахуванням закону управління, яка базується на чисельному методі скінченних елементів та дозволяє аналізувати будь-які конструктивні варіанти, що підвищує ступінь вірогідності математичних моделей динаміки роторів;

– вперше знайдено розрахунково та експериментально обґрунтоване пояснення деяких особливостей динамічної поведінки роторів турбомашин в пасивних і активних магнітних підшипниках, таких як можливість виникнення зворотної прецесії, роздвоєння резонансів, неосновних резонансів тощо;

– вперше експериментально виявлено та чисельно змодельовано нові явища, такі як взаємопов'язаність радіальних і осьових коливань роторів в магнітних підшипниках та їх резонансних рухів, а також дестабілізуючий вплив магнітної незрівноваженості у вузлах магнітних підшипників;

– вперше запропоновано спосіб та алгоритм дискретного управління активними магнітними підшипниками у вигляді навантаженого по дугам графа, основними достоїнствами яких є підвищення швидкодії, розширення діапазону стійкості системи автоматичного регулювання по відношенню до різних діянь на ротор в

- активних магнітних підшипниках;
 - вперше запропоновано новий вид пасивних магнітних підшипників на кільцевих постійних магнітах з обмоткою підмагнічування для забезпечення керованої жорсткості обпирання ротору;
 - набув подальшого розвитку спосіб проходження критичних швидкостей роторів, який було адаптовано для роторних систем з пасивними магнітними підшипниками за рахунок застосування для них принципу керованості жорсткістю.

4. Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність отриманих теоретичних, практичних та експериментальних результатів визначається тим, що:

- розроблені здобувачем нові підходи до моделювання роторної динаміки з комплексним урахуванням багатьох особливостей як активних, так і пасивних магнітних підшипників дозволяють точніше моделювати процеси та явища роторної динаміки, що дає можливість зменшити обсяг експериментальних досліджень при розробці нових турбомашин з магнітними підшипниками та модернізації існуючих зразків роторної техніки;

- уточнене розрахункове визначення параметрів роторів, самих магнітних підшипників та систем управління активними магнітними підшипниками дозволяє за допомогою варіювання ними знаходити оптимальні комбінації для отримання необхідних динамічних характеристик роторної машини в цілому, що призведе до зниження собівартості та експлуатаційних витрат, а впровадження цих результатів на підприємствах турбомашинобудування дозволяє підняти ефективність проведення науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи;

- уточнені методики чисельного аналізу пасивних магнітних підшипників різної конфігурації та аналітичного отримання виразів магнітної енергії та електромагнітних сил в активних магнітних підшипниках дозволяє розрахунково отримувати силові характеристики, що дає можливість здійснювати автоматизований пошук цих вузлів обпирання з визначеними параметрами під кожну конкретну машину при відомих рівнях експлуатаційних навантажень та знижує витрати ресурсів та часу на створення одиничних зразків;

- доказана в роботі на прикладі лабораторної установки та детандер-компресорного агрегату можливість використання комбінованих пасивно-активних магнітних підвісів роторів для реальних роторних турбомашин та нового способу дискретного управління активними магнітними підшипниками з забезпеченням необхідної жорсткості обпирання та заданих меж стійкості руху ротора дозволяє знизити собівартість машини в цілому, підвищити надійність експлуатації та зменшити поточні витрати;

- використання пасивних магнітних підшипників з керованою жорсткістю, працездатність яких доведена в роботі, дозволяє знизити амплітуди коливань роторів за рахунок застосування для пасивно-активних магнітних підвісів способів відстроювання від критичних швидкостей, що підвищує надійність та збільшує

ресурс роторної машини.

Результати науково-практичних досліджень впроваджені на ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання» і використані при виконанні науково-дослідних робіт та в навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Документи, що підтверджують практичну цінність отриманих результатів, а саме акти впровадження, видані ПАТ «Сумське НВО» та НТУ «ХПІ», які містять грамоти і дипломи за науково-технічну розробку кафедри динаміки та міцності машин «Магнітний та електромагнітний підвіс роторних машин», наведені в Додатку 1 до дисертації.

5. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні результати дисертаційної роботи цілком повно відображені в 90 наукових працях, зокрема 45 публікацій в наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 9 публікацій у виданнях іноземних держав або у виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз, зокрема – 4 в іноземних періодичних виданнях, з яких 3 входять до НМД РИНЦ, а 1 до Scopus і Web of Science, та 5 у виданнях України, з яких 5 входять до НМД РИНЦ, а 1 до Scopus); 43 публікації в тезах і матеріалах конференцій; 2 патенти, з яких 1 зарубіжний. З загального переліку 52 праці є одноосібними, що свідчить про великий особистий науковий здобуток здобувача. Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на понад 40 наукових конференціях, з яких 37 міжнародних, а 2 зарубіжні. Робота в повному обсязі розглядалась і обговорювалась в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» на засіданні кафедри динаміки та міцності машин.

Обсяг і рівень публікацій відповідають вимогам, що висуваються до докторських дисертацій. Зміст автореферату є ідентичним основним положенням дисертації та у повній мірі відбиває отримані автором результати наукових досліджень. Автореферат дисертації відображає її зміст, ідеї, і висновки. У авторефераті розкрито внесок здобувача в даний науковий напрям, новизна розробок, значення теоретичних, практичних та експериментальних результатів досліджень.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи

Основна частина дисертаційної роботи складається зі вступу, п'яти розділів та висновків. Список використаних джерел інформації містить 489 публікацій, а в 9 додатках наведено відомості щодо впровадження і публікацій здобувача, а також результатів наукових досліджень, які є допоміжними.

У вступі викладено історію розвитку наукових напрямків за предметом та об'єктом досліджень, обґрунтовано вибір теми, надано загальну характеристику роботи, яка складається з наукової новизни, практичної цінності, зв'язку роботи з науковими темами.

Перший розділ присвячено історії, теоретичним основам, актуальним про-

блемам, аналізу існуючих підходів, методів, методик і засобів аналізу явищ роторної динаміки з урахуванням підшипників ковзання, кочення і магнітних підшипників. Зроблено огляд значної кількості літературних джерел вітчизняних та зарубіжних авторів, виконано оцінку сучасного стану питань та здійснено вибір перспективних напрямків досліджень, на підставі яких сформульовано цілі і завдання досліджень.

У *другому розділі* досягнуто основні цілі роботи шляхом вирішення задачі з розробки нових теоретичних і практичних підходів до моделювання динамічних процесів, які притаманні роторним системам з пасивними та активними магнітними підшипниками. В цьому розділі можна виділити декілька напрямків, а саме: вибір та обґрунтування способу опису роторів в магнітних підшипниках як динамічних електромагнітомеханічних систем; спосіб формування нелінійних рівнянь руху ротора в магнітних підшипниках; методологія формування рівнянь, що описують поведінку активних магнітних підшипників як електромагнітних систем, з викладенням запропонованого способу аналізу електромагнітних кіл АМП з метою знаходження уточнених аналітичних виразів магнітних енергії і сил; методика формування повної нелінійної динамічної моделі жорстких та гнучких роторів в магнітних підшипниках із зазначенням особливостей цієї моделі при наявності активних та пасивних магнітних підшипників в різних комбінаціях та з описом розроблених і експериментально перевірених чисельних методик визначення їх силових характеристик; комп'ютерні та програмні засоби для розрахунку параметрів магнітних підшипників і роторної динаміки з їх урахуванням. Таким чином, можна зробити висновок, що запропонований у другому розділі підхід до моделювання динамічної поведінки роторів турбомашин з магнітними підшипниками пасивних та активних типів дозволяє усунути недоліки існуючих математичних моделей визначені при аналізі сучасного стану науково-прикладної проблеми.

Третій розділ присвячено опису результату досліджень з розробки підходів до створення нових способів, алгоритмів і пристроїв управління активними магнітними підшипниками, а також фізичній реалізації комбінованого пасивно-активного магнітного підвісу ротора шляхом створення діючої лабораторної установки одним осьовим АМП і двома радіальними ПМП та проведенню на цій установці власних експериментів. В цьому розділі висвітлені такі питання: опис розробленого та запатентованого способу і алгоритму дискретного управління активними магнітними підшипниками, що відзначається підвищеною швидкістю, можливістю врахування поточних значень значної кількості параметрів при виробленні керуючих сигналів для забезпечення потрібного рівня стійкості руху ротора; реалізація цього способу управління для лабораторної моделі ротора в комбінованому магнітному підвісі; програмно-апаратний комплекс вимірювання і аналізу вібропереміщень ротора в магнітних підшипниках та опис власних експериментальних дослідження динаміки модельного ротора. Таким чином, цими дослідженнями було досягнуто практичні цілі роботи по апробації запропонованих способів та засобів управління та реєстрації експериментальних даних необхідних для перевірки розроблених способів та методик моделювання роторної динаміки з

адекватним урахуванням пасивних і активних магнітних підшипників.

У четвертому розділі дано опис та аналіз практичного застосування розроблених підходів до математичного опису динаміки роторів в магнітних підшипниках пасивного і активного типу на прикладі лабораторної установки. Матеріал цього розділу включає опис вирішення таких задач на прикладі ротора лабораторної установки в пасивних і активних магнітних підшипниках: розрахунок параметрів лінійних коливань ротора лабораторної моделі вихідної конструкції; вирішення задачі про нелінійну динаміку ротора лабораторної моделі вихідної конструкції; обґрунтування необхідності застосування нелінійних моделей для опису динаміки роторів в магнітних підшипниках різних типів; визначення параметрів і характеристик та аналіз лінійних і нелінійних коливань ротора лабораторної установки модифікованої конструкції; оцінка стійкості обертового ротора в комбінованому магнітному підвісі; новий пасивний магнітний підшипник з керованою жорсткістю; спосіб проходження резонансних режимів при розгоні і зупині роторів в пасивно-активних магнітних підвісах. Таким чином, в цьому розділі досягнуто основну мету з ідентифікації і доказу адекватності запропонованих в роботі нових методик математичного визначення параметрів магнітних підшипників і основних характеристик динаміки роторів, способу аналізу електромагнітних кіл АМП, а також способу математичного моделювання явищ роторної динаміки в системах з магнітними підшипниками.

П'ятий розділ присвячено використанню запропонованих способів і засобів для розробки і створення магнітних опор ротора детандер-компресорного агрегату та моделювання явищ роторної динаміки, що відбуваються в цьому детандер-компресорному агрегаті з радіальними пасивними і осьовим активним магнітними підшипниками, а також у енергетичній газотурбінній установці з ротором тільки в активних магнітних підшипниках. Таким чином розділ має відповідно два підрозділи, в котрих висвітлено наступне: модифікація конструкції ротора ДКА під установку магнітних підшипників на підставі розрахунку власних частот та критичних швидкостей в лінійній постановці; обґрунтування можливості застосування пасивних магнітних підшипників для ротора ДКА; методологія варіантного оптимального пошуку конструкції та параметрів пасивних магнітних підшипників, що забезпечують потрібну підйомну силу та жорсткість опираючого ротора реального детандер-компресорного агрегату, із застосуванням розроблених чисельних методик та програмних засобів; радіальний пасивний магнітний підшипник для ротора ДКА з оптимальними характеристиками; осьовий активний магнітний підшипник для ротора ДКА; лінійний та нелінійний аналіз динаміки ротора ДКА; оцінка стійкості обертового ротора ДКА в комбінованому магнітному підвісі; аналіз лінійних коливань роторів ГТУ; верифікація імітаційної моделі для дослідження динаміки роторів ГТУ в активних магнітних підшипниках; аналіз динаміки роторів компресора і генератора ГТУ в АМП на робочих режимах. Таким чином, у цьому розділі досягнуто кінцеві цілі щодо практичного використання розроблених математичних моделей, способів, методик, алгоритмів і засобів.

У висновках викладено та проаналізовано отримані наукові та практичні ре-

зультати, які доводять, що зазначену в роботі науково-прикладну проблему було вирішено, а також надано рекомендації щодо впровадження результатів.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що здобувач провівши сукупність наукових досліджень, спираючись на сучасні підходи та методи досліджень, технічні та програмні засоби, досяг поставленої мети.

7. Зауваження по дисертаційній роботі

1. Перший розділ перевантажений інформацією, яка є в деяких випадках загальновідомою, наприклад, про історію та початкові спроби моделювання роторної динаміки.

2. Для розрахунку власних і критичних частот багато масових лінійних моделей роторних систем необхідно знати залежності динамічних коефіцієнтів магнітних підшипників (пружності, опору та циркуляційних складових) від частоти обертання. З тексту дисертаційної роботи не зовсім зрозуміло, які методики розрахунку таких залежностей використовувалися, наприклад, при розрахунку критичних швидкостей ротора детандер-компресорного агрегату (див. п. 5.1.2 та 5.1.3).

3. На основі розроблених на теперішній час методів оцінювання (ідентифікації) параметрів динамічних моделей за експериментальними вимірними амплітудами вимушених коливань, а також власними частотами і формами вільних коливань можна було б оцінити запропоновані методи побудови і розрахунку математичних моделей підшипників. В роботі проведені, так би мовити, інтегральні зіставлення експериментально отриманих і розрахункових критичних частот. Задовільне співпадання не обов'язково свідчить про адекватність тих чи інших коефіцієнтів моделі. В подальших дослідженнях було б доцільно використовувати методи ідентифікації, принаймні оцінювання параметрів при заданій структурі моделі.

Проте зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи здобувача.

8. Висновок

На підставі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату і публікацій вважаю, що дисертація Мартиненка Геннадія Юрійовича «Динаміка роторів турбомашин в пасивних і активних магнітних підшипниках» відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Дисертаційна робота Мартиненка Геннадія Юрійовича є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують науково-прикладну проблему зі створення нового загального способу математичного опису динамічної поведінки роторів в системах з пасивними і активними магнітними підшипниками в різних комбінаціях. Запропоновані підходи,

- способи, методики, моделі та засоби, а також результаті чисельних та експериментальних досліджень мають суттєве значення для розвитку технічних наук, а саме напрямку в машинознавстві з опису та моделювання динамічних процесів та явищ в складних магнітомеханічних і мехатронних системах та машинах. Робота виконана на високому рівні, містить нові, цінні з наукової і практичної точок зору результати, написана технічно грамотною мовою. Результати роботи підтверджені актами про впровадження у виробництво, науково-дослідний та учбовий процес. Результати кандидатської дисертації Мартиненка Г.Ю. не виносяться на захист його докторської дисертації.

Дисертаційна робота за актуальністю теми, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, висновків і рекомендацій, новизною досліджень та практичною цінністю отриманих результатів, а також повнотою їх викладу в опублікованих працях відповідає вимогам п.п. 9, 10 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р. № 656), а її автор, Мартиненко Геннадій Юрійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент,

професор кафедри
загальної механіки та динаміки машин
Сумського державного університету
доктор технічних наук, професор

Підпис Симоновського В.І.
засвідчує проф. ґал відділу кадрів
Сумського ДУ



Симоновський В.І.