

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МАРТИНЕНКО ГЕННАДІЙ ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.822.5:531.382

ДИНАМІКА РОТОРІВ ТУРБОМАШИН
В ПАСИВНИХ І АКТИВНИХ МАГНІТНИХ ПІДШИПНИКАХ

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Аврамов Костянтин Віталійович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,
завідувач відділу надійності та динамічної міцності.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зіньковський Анатолій Павлович,
Інститут проблем міцності
ім. Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ,
заступник директора Інституту з наукової роботи,
завідувач відділу коливань та вібраційної надійності;

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Державна установа «Інститут технічних
проблем магнетизму НАН України», м. Харків,
завідувач відділу проблем управління магнітним полем;

доктор технічних наук, професор
Симоновський Віталій Іович,
Сумський державний університет, м. Суми,
професор кафедри загальної механіки та динаміки
машин.

Захист відбудеться «21» листопада 2018 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, а також на сайті <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vrada/>.

Автореферат розісланий «19» жовтня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.050.10



О.О. Ларін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. *Динаміка роторів в різних опорах* є досить складним процесом, що вимагає поглибленого вивчення як на етапі конструювання будь-якої роторної енергетичної машини, так і на етапах дослідної експлуатації і доведення серійного зразка. Метою такого аналізу є зниження віброактивності роторної машини, тому що підвищені амплітуди коливань елементів конструкції можуть призводити до виходу з ладу як окремих вузлів, так і установок в цілому.

Оцінюючи проблему опису динаміки роторів різних енергетичних машин, у яких в якості опорних вузлів роторів застосовується один з найбільш прогресивних варіантів, а саме магнітні підшипники (МП), можна зробити висновок про необхідність розробки спеціальних підходів до математичного моделювання з урахуванням всіх особливостей внесених в роторні системи цим видом пружно-демпферних опор.

На сьогоднішній день існує безліч наукових робіт з цієї тематики, проте аналіз існуючих монографій, а також великої кількості статей і матеріалів конференцій різних авторів, присвячених проблемі аналізу і синтезу роторних систем з магнітними підшипниками, дозволяє зробити висновок про домінуючий спрощений підхід до математичного моделювання динаміки їх роторів. Деякі основні спрощення зводяться до наступного: диференціальні рівняння руху ротора лінеаризуються; магнітні сили описуються спрощеними формулами, що не враховують нерівномірність зазору і магнітний опір магнітопроводів активних магнітних підшипників (АМП); не враховується вплив зміщень в одному напрямі на величину магнітної сили в іншому, що призводить до фактичного поділу системи рівнянь на окремі не зв'язані рівняння та ін.

Тема дослідження пов'язана з розробкою нового загального способу аналітичного опису динаміки роторів в магнітних підшипниках різних типів (пасивних і активних) з урахуванням нелінійного характеру зв'язків між електричними, магнітними та механічними процесами, що відбуваються в системі, і з можливістю включення в математичну модель закону управління системи регулювання АМП, конфігурації магнітопроводів статорних і роторних частин АМП, силових характеристик пасивних магнітних підшипників (ПМП) та ін.

Актуальність теми визначається тим, що в Україні є кілька машинобудівних підприємств (ПАТ «Сумське НВО», ПАТ «Турбогаз» та ін.), що випускають роторні турбомашини з магнітними підшипниками. Однак на ці машини встановлюються МП, виготовлені за індивідуальними замовленнями іноземними компаніями. На сьогоднішній день існує прогалина в області моделювання лінійних і, особливо, нелінійних явищ роторної динаміки в системах з пасивними і активними МП. Це істотно звужує можливості дослідників і конструкторів, особливо вітчизняних підприємств, з апробації нових або існуючих конструктивних варіантів ПМП при їх впровадженні для конкретних роторних машин або з перевірки нових алгоритмів і законів управління АМП шляхом проведення числових, а не високовартісних натурних експериментів. Тому наукові дослідження зі створення нових зразків магнітних підшипників, а також способів математичного опису динамічних процесів, що відбуваються в таких складних електромагнітомеханічних системах, з метою адекватного вибору параметрів МП, що забезпечують необхідні динамічні характеристики всієї роторної машини, є дуже актуальними, особливо якщо врахувати, що існуючі методи і підходи,

відомі з наукових джерел, мають цілу низку недоліків, пов'язаних з неврахуванням або неповним врахуванням всіх особливостей мехатронної системи «ротор в МП».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в рамках науково-дослідних робіт, що фінансуються з державного бюджету за планами фундаментальних робіт МОН України: «Розробка теоретичних і експериментальних методів дослідження коливань і надійності складних роторних систем з метою збільшення їх ресурсу і зниження енергетичних витрат на виготовлення і експлуатацію» ДР № 0100U001651 (2000-2002 р.р.), «Створення розрахунково-експериментальних методів діагностики та продовження ресурсу роторних машин по міцнісним та динамічним критеріям» ДР № 0103U001496 (2003-2005 р.р.), «Розробка методів вирішення задач нелінійної механіки та надійності систем в магнітних полях та газодинамічних потоках» ДР № 0106U001474 (2006-2008 р.р.), «Розробка методів прогнозування динамічної міцності та ресурсу роторних систем з дефектами на рідинних та магнітних опорах» ДР № 0109U002383 (2009-2011 р.р.), «Розробка теоретичних основ і методів рішення задач забезпечення міцності та надійності високонавантажених елементів машинобудівних конструкцій» ДР № 0112U000403 (2012-2014 р.р.), «Розробка математичних моделей і методів рішення нелінійних задач динаміки та міцності елементів конструкцій при дії квазістатичних, динамічних та ударних навантажень» ДР № 0115U000509 (2015-2017 р.р.), а також в рамках договорів на створення науково-технічної продукції між НТУ «ХПІ» та ПАТ «Сумське НВО» «Розробка методик і дослідження перспективних вузлів і систем відцентрових компресорів ГПА» ДР № 0196U022150 (1996-2007 р.р.) і «Розробка цифрової системи управління і конструкції магнітного підвісу ротора» (2004-2005 р.р.), в яких здобувач був відповідальним виконавцем або виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є вирішення науково-прикладної проблеми по створенню нового загального способу математичного опису динамічної поведінки роторів в системах з магнітними підшипниками різних типів, який відрізняється узагальненістю підходу і повнотою врахування нелінійного взаємозв'язку процесів, котрі відбуваються в такій системі – електричних, магнітних і механічних, що дозволяє домогтися можливості адекватного моделювання та пошуку різних динамічних явищ і режимів роботи для знаходження раціональних або оптимальних варіантів конструкцій роторних машин зі зниженою віброактивністю і підвищеною надійністю, а також верифікація цього способу за допомогою порівняльного аналізу для експериментальної лабораторної моделі, що реалізує комбінований пасивно-активний магнітний підвіс ротора, і практичне його використання для аналізу та синтезу складних промислових роторних машин із магнітними підшипниками.*

Для досягнення поставлених цілей досліджень в роботі відповідно до них ставляться і вирішуються такі три групи завдань (1-5, 6-9, 10):

1. Аналіз сучасного стану питань щодо загального стану проблеми, підходів і методів математичного опису та моделювання динамічної поведінки роторів різних механічних систем з пасивними і активними магнітними підшипниками.

2. Розробка загального способу формування аналітичних моделей для математичного опису динаміки жорстких і гнучких роторів в повних магнітних підвісах, що реалізуються магнітними підшипниками різних типів, з адекватною передачею

нелінійного взаємозв'язку процесів, які відбуваються в такій системі (механічних, магнітних і електричних), обумовлених більшістю практично значущих фізичних і конструктивних особливостей, з урахуванням керуючих діянь, що виробляються системами автоматичного управління АМП в разі їх наявності.

3. Розробка способу і алгоритму пошуку силових і жорсткісних характеристик пасивних магнітних підшипників за допомогою числових підходів і методів для використання при математичному моделюванні динаміки роторів.

4. Розробка аналітичного методу аналізу електромагнітних кіл активних магнітних підшипників з метою знаходження виразів магнітної енергії і сил з урахуванням законів управління для включення в математичні моделі динаміки роторів в магнітних підшипниках.

5. Створення для реалізації та верифікації запропонованого способу математичного опису та підходів до моделювання динамічної поведінки роторів в МП:

– методики розрахунку і інтегрованого програмного засобу для визначення за допомогою числових методів силових і жорсткісних характеристик ПМП і АМП з урахуванням законів управління для верифікації аналітичних виразів;

– методики розрахунку за допомогою числових методів і на її основі інтегрованого програмного засобу для аналізу динамічних параметрів роторів (валів з навісними елементами) в опорах різного типу для верифікації аналітичних моделей;

– імітаційної обчислювальної моделі, побудованої на основі розробленої взаємопов'язаної магнітомеханічної багатовимірної нелінійної математичної моделі ротора в магнітних підшипниках, призначеної для проведення варіантних розрахунків на динамічну стійкість при різних режимах роботи роторних машин, дослідження механізмів збудження просторових коливань обертових жорстких і гнучких роторів, з'ясування умов існування різних резонансних режимів, супер-, субгармонічних і комбінаційних коливань, а також апробації алгоритмів управління і вибору раціональних (або оптимальних) параметрів магнітних підвісів.

6. Розробка способу, алгоритму та схеми дискретного управління електромагнітним підвісом обертових роторів для систем автоматичного управління АМП, які дозволять забезпечити стійкість руху ротора при діянні збуджуючих навантажень в заданих діапазонах значень, а також розробка і фізична реалізація лабораторної установки ротора в повному магнітно-електромагнітному підвісі для проведення експериментальних досліджень з метою виконання порівняльного аналізу і підтвердження застосовності та адекватності створених математичних моделей динаміки обертових роторів в магнітних підшипниках, способів і алгоритмів визначення механічних і електромагнітних величин і характеристик, що входять до них, а також для апробації та підтвердження працездатності алгоритмів управління.

7. Розробка програмно-апаратного комплексу для вимірювання і аналізу динамічних характеристик роторів з системами повного магнітного підвісу і його адаптація для проведення експериментальних досліджень на оригінальних авторських лабораторних установках, а також створення методики та проведення з використанням цього комплексу експериментальних досліджень і порівняльного аналізу динаміки модельних роторів лабораторної установки з магнітними підшипниками різних типів для підтвердження адекватності та верифікації аналітичних розрахункових

моделей для виявлення переваг, пов'язаних з їх застосуванням в порівнянні з іншими, з точки зору коректного опису динаміки роторів при можливому виникненні супер- і субгармонічних, комбінаційних, хаотичних та інших нелінійних коливань.

8. Проведення з використанням нової аналітичної і створеної на її основі імітаційної обчислювальної моделей для лабораторних установок роторів в ПМП і АМП комплексних розрахунково-експериментальних порівняльних досліджень з визначення, ідентифікації та оцінки різних лінійних і нелінійних явищ роторної динаміки, властивих системам з магнітними підшипниками, з урахуванням особливостей, обумовлених нелінійною взаємозв'язаністю електричних, магнітних і механічних процесів, для оцінки їх переваг та достовірності на підставі експериментальних даних.

9. Розробка і фізична реалізація радіальних магнітних підшипників на постійних кільцевих магнітах, а також створення на їх базі нового типу пасивного магнітного підшипника з короткочасно автоматично змінними механічними характеристиками за рахунок зміни немеханічних величин для реалізації способу безпечного розгону і зупину роторів за допомогою відстроювання від резонансних режимів і зниження амплітуд вібрацій в областях, що відповідають критичним швидкостям.

10. Проведення з використанням розроблених математичних моделей розрахункових досліджень динаміки реальних роторних систем з магнітними підшипниками, які є роторними машинами енергетичного машинобудування, для їх синтезу та аналізу динамічної поведінки обертових роторів з метою зниження віброактивності, визначення раціональних або оптимальних параметрів ротора і магнітних підшипників.

Об'єктом досліджень є динамічні процеси у багатовимірних взаємозалежних мехатронних роторних системах з урахуванням різних факторів, що роблять істотний вплив на їх вібраційний стан та стійкість руху конструктивних елементів.

Предметом досліджень є лінійні і нелінійні явища роторної динаміки в системах з магнітними підшипниками різних типів з урахуванням взаємозв'язку електричних, магнітних і механічних стаціонарних і нестаціонарних процесів.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених задач застосовувалися аналітичні методи теоретичної механіки, теорії коливань, математичного аналізу, теорії автоматичного управління, теорії стійкості, електротехніки, теорії оптимізації, а також числові методи і методи експериментальних досліджень. Запропоновані в роботі способи являють собою комбінації відомих методів і призначені для вирішення конкретних задач. Так, для формування математичної моделі динаміки роторів в магнітних підшипниках різних типів використовувалися диференціальні рівняння Лагранжа-Максвелла, що мають структуру рівнянь механіки, в яких для визначення виразів магнітної енергії і магнітних сил застосовувалися аналітичний метод контурних магнітних потоків і числовий метод скінченних елементів. Оптимальне проектування пасивних магнітних підшипників різних конструкцій здійснювалося методом апроксимацій (послідовного наближення) і градієнтним методом найшвидшого спуску. Для організації управління, тобто формування алгоритмів і законів управління активними магнітними підшипниками, застосовувалися методи теорії автоматичного управління, використовувані при проектуванні та аналізі мехатронних пристроїв. Для попереднього лінійного аналізу динаміки роторних систем використовувався метод скінченних елементів, а інтегрування систем нелінійних диференціаль-

них рівнянь, що утворюють запропоновану аналітичну модель динаміки ротора в магнітних підшипниках, виконувалося чисельно методом Рунге-Кутта. Аналіз динамічного стану роторних систем виконувався з використанням методів роторної динаміки, серед яких графічний метод визначення критичних швидкостей на основі частотної діаграми Кемпбелла. Оцінка стійкості руху роторів в МП здійснювалася на основі методів математичного аналізу нелінійних коливальних систем, зокрема графоаналітичного методу побудови фазових діаграм коливань і методу стробоскопічного дослідження, що є окремим випадком методу точкових відображень Пуанкаре. При проведенні і аналізі результатів експериментальних досліджень застосовувалися засоби і методи вимірювань, що базуються на законах метрології, а також методи обробки і аналізу дослідних даних, наприклад, аналого-цифрове перетворення, дискретне, швидке і короткочасове перетворення Фур'є.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вперше запропоновано* узагальнюючий підхід до моделювання динамічної поведінки роторів турбомашин з магнітними підшипниками різних типів, який дозволяє комплексно і всебічно усунути недоліки існуючих математичних моделей динаміки роторів в МП, відобразити нелінійний взаємозв'язок узагальнених механічних координат, струмів і потокочеплень в АМП і врахувати практично всі істотні види і причини нелінійного поведіння системи «ротор в МП», такі як нелінійна залежність магнітних сил від зазорів між рухомими і нерухомими частинами ПМП і АМП, а також струмів в обмотках електромагнітів АМП; запізнювання струму в обмотках електромагнітів АМП, пов'язане з індуктивністю котушок; наявність геометричного зв'язку між електромагнітами одного АМП та зв'язку між усіма АМП одного ротора, що призводить до пов'язаності процесів в ортогональних напрямках та ін.

2. *Вперше запропоновано* експериментально підтверджений підхід до опису магнітних кіл АМП на основі схем заміщення з урахуванням магнітних опорів ділянок магнітопроводів і потоків розсіювання для визначення в аналітичному вигляді виразів енергії магнітного поля в АМП, залежностей поткочеплень від струмів і магнітних потоків від поткочеплень, магнітних сил від узагальнених координат і поткочеплень (або струмів) з урахуванням закону управління АМП, *уточнений характер яких* дозволяє уникнути неточностей в математичній моделі динаміки ротора в АМП, що виникають при наближеному, а іноді напівемпіричному визначенні коефіцієнтів в розкладанні виразу магнітної коенергії в ряд Тейлора, що підвищує адекватність моделювання динаміки мехатронної системи «ротор в АМП» в цілому.

3. *Вперше* на основі результатів порівняльних розрахунків провідностей повітряних зазорів і магнітних сил, розрахованих з використанням схем заміщення з урахуванням і без урахування опорів ділянок магнітних кіл АМП і залежностей від всіх узагальнених координат і поткочеплень (або струмів), *доведені суттєва нелінійність характеристик і необхідність* врахування окремих змінних (для радіальних АМП – осьових зміщень, а для осьових АМП – радіальних), тому що їх неврахування може призвести до неточних зображень силових характеристик в математичних моделях динаміки роторів в АМП і, відповідно, до їх помилковості.

4. *Вперше* за допомогою створеної та практично перевіреної методики скінченноелементного розрахунку, *отримано оптимізовані залежності* радіальних і

осьових зусиль для серії радіальних пасивних магнітних підшипників різної конфігурації, виконаних з використанням кільцевих постійних магнітів, як з осьовою, так і з радіальною намагніченістю, що дало можливість вперше дати їх якісний і кількісний порівняльний аналіз, що дозволяє здійснювати усвідомлений вибір для досягнення необхідних динамічних характеристик роторних машин різного призначення.

5. *Вперше* за допомогою *створених нових імітаційних обчислювальних моделей*, в основу яких покладені запропоновані і обґрунтовані в роботі математичні моделі і способи визначення параметрів і характеристик, *знайдено пояснення деяких особливостей динамічної поведінки* реальних роторних систем з магнітними підшипниками (турбокомпресорів, турбодетандерів, турбогенераторів та ін.), а саме наявність зворотної прецесії і роздвоєння резонансів при використанні пасивних магнітних підшипників, можливість проявів суб-, супер- і внутрішніх резонансів, значне збільшення амплітуд при русі ротора типу конічної прецесії (кутових коливаннях) через порушення пласкопаральності зазорів в осьовому АМП, що призводить до виникнення моменту, що збігається за напрямом з кутовим відхиленням ротора.

6. *Вперше* на основі запропонованої загальної концепції математичного опису нелінійної динаміки роторів в магнітних підшипниках різних типів (пасивних і активних) з урахуванням взаємозв'язку механічних, електричних і магнітних процесів, що відбуваються в системі, *виявлено нові явища*, що знайшли експериментальне підтвердження, такі як взаємопов'язаність радіальних і осьових коливань і резонансних режимів, а також вплив магнітної незрівноваженості, викликаної технологічними і експлуатаційними недосконалостями, на стійкість руху ротора в магнітних підшипниках.

7. *Вперше запропоновано нові спосіб і алгоритм* дискретного управління напруженнями, що подаються на обмотки управління АМП, які забезпечують можливість збільшення діапазону стійких рухів роторів в зазорах АМП і дозволяють поліпшити динамічні властивості системи «ротор в АМП», в тому числі знизити її віброактивність, за рахунок забезпечення раціональних значень жорсткості опираючої і демпфуючих характеристик, і, як наслідок, підвищити надійність експлуатації роторної машини в цілому (працездатність підтверджена експериментально на лабораторній установці модельного ротора в комбінованому магнітному підвісі).

8. *Створено новий вид* пасивних магнітних підшипників зі змінною жорсткістю, виконаних з використанням кільцевих постійних магнітів з обмоткою підмагнічування, а також *запропоновано спосіб* управління їх жорсткістю в залежності від сигналів, що характеризують різні величини (наприклад, швидкість обертання ротора), який робить можливим відстроювання від критичних швидкостей в системах з ПМП.

9. *Розроблено* (на підставі відомого принципу, який раніше застосовувався тільки в системах з АМП) та експериментально *підтверджено спосіб* проходження резонансних режимів (критичних швидкостей) обертових роторів в *комбінованих пасивно-активних магнітних підвісах*, заснований на можливості зміни механічної жорсткості і демпфуючих властивостей магнітних підшипників за допомогою зміни немеханічних величин (активних опорів, напруг і струмів зміщення в електричних колах обмоток управління АМП та підмагнічування ПМП), що дозволяє введенням зворотного зв'язку по кутовій швидкості здійснювати безпечний розгін до робочих обертів або вибіг ротора, за допомогою оперативної зміни значень резонансних частот.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Застосування нових, більш точних підходів до моделювання динаміки роторних систем з магнітними підшипниками сприяє поліпшенню динамічних параметрів цілого класу роторних машин за рахунок більш коректного опису динамічних процесів і явищ, які відбуваються в них, що в свою чергу призводить до зменшення вартості доводочних робіт на етапі конструювання та введення в експлуатацію, а також зниження експлуатаційних витрат і витрат на енергоресурси.

2. Використання результатів роботи дозволяє підвищити достовірність розрахункового визначення параметрів роторів, магнітних підшипників і систем управління активними магнітними підшипниками, що дає можливість істотного скорочення обсягу експериментальних досліджень, а впровадження цих результатів на підприємствах турбомашинобудування дозволяє підняти ефективність проведення науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи при створенні нових варіантів конструкцій турбомашин з магнітними підшипниками або модернізація існуючих.

3. Можливість установки пасивних магнітних підшипників спільно з активними магнітними підшипниками для реалізації комбінованого магнітного підвісу роторів промислових турбомашин із забезпеченням необхідного діапазону стійкості руху, яка доведена в роботі, дозволяє підвищити надійність, знизити собівартість і енерговитратність таких роторних машин, як середньорозмірні компресори, детандери і насоси, а також підняти рівень динамічної стійкості їх роторів за рахунок зменшення ймовірності виникнення біфуркацій Хопфа, прояв яких є властивим системам з АМП.

4. Застосування на практиці нового типу ПМП з керованою жорсткістю забезпечує реалізацію способу відстроювання від резонансних режимів при розгоні роторів і їх вибігу в машинах, в яких для обпирання ротора застосовуються комбіновані пасивно-активні магнітні підвіси, що дозволяє знизити віброактивність машин, збільшити їх надійність і ресурс роботи.

5. Впровадження запатентованого способу дискретного управління електромагнітним підвісом обертових роторів, тобто управління активними магнітними підшипниками, сприяє підвищенню швидкодії і розширенню діапазону стійкості системи до різних діянь, що в свою чергу підвищує економічність експлуатації машини з самоналагоджуваною системою управління АМП, в основу якої покладено цей спосіб.

6. Використання нового способу аналітичного визначення силових і жорсткісних характеристик, запропонованого і обґрунтованого в роботі, дозволяє включати знайдені за його допомогою вирази в математичні моделі і виконувати швидко і точно розрахунки силових і жорсткісних характеристик типорозмірних рядів АМП з урахуванням їх геометричних і фізичних параметрів і, що особливо важливо, з урахуванням законів управління, а це дає можливість зниження витрат на створення унікальних зразків АМП для конкретних роторних машин.

7. Наукові розробки та практичні результати досліджень були використані при виконанні НДР з держбюджетної та господарчо-договірної тематики, а також в навчальному процесі кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХПІ» при викладанні профільюючих курсів для студентів спеціальностей «Динаміка і міцність», «Комп'ютерна механіка», «Інформаційні технології проектування». Їх впровадження підтверджується 9-ма актами, виданими НТУ «ХПІ» та ПАТ «Сумське НВО».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні положення і практичні результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз сучасного стану проблеми і вибір напрямків досліджень; концепція побудови аналітичних моделей для опису динаміки роторів в магнітних підшипниках пасивного та активного типів; розрахункові схеми жорсткого і гнучкого роторів в МП; замкнена система диференціальних лінеаризованих і нелінійних рівнянь руху жорсткого і гнучкого роторів в МП та рівнянь, що враховують динамічні процеси в АМП; спосіб аналізу електромагнітних кіл активних магнітних підшипників з метою знаходження уточнених аналітичних виразів магнітних енергії і сил з урахуванням закону управління; методика скінченноелементного розрахунку силових і жорсткісних характеристик ПМП і АМП; комп'ютерні та програмні засоби для розрахунку параметрів МП і роторної динаміки з їх урахуванням; математичний опис і обґрунтування запропонованого способу дискретного управління АМП, а також проведені чисельне і експериментальне підтвердження стійкості руху модельного ротора в АМП, керованих відповідно до цього способу; концепція реалізації даного способу управління для лабораторної моделі ротора в комбінованому магнітному підвісі і самої лабораторної установки; структурна схема і концепція фізичної реалізації програмно-апаратного комплексу вимірювання і аналізу вібропереміщень ротора в МП; план і методика проведення експериментальних досліджень динаміки модельних роторів двох конструктивних виконань; результати розрахункових та експериментальних досліджень динаміки модельних роторів в МП; новий вид пасивного магнітного підшипника зі змінною жорсткістю, а також розрахункові моделі і результати числового пошуку силових характеристик його різних конструкцій; спосіб проходження резонансних режимів при розгоні і зупинці роторів в пасивно-активних магнітних підвісах; результати варіантних розрахункових досліджень з пошуку оптимальних параметрів різних конструкцій пасивних магнітних підшипників для ротора детандер-компресорного агрегату; математичні моделі і результати розрахункових досліджень динаміки роторів енергетичних турбомашин з магнітними підшипниками, зокрема, детандер-компресорного агрегату і енергетичної газотурбінної установки. У роботах, опублікованих зі співавторами особистий внесок вказано поруч з відповідною публікацією у *Списку опублікованих праць за темою дисертації*.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень неодноразово презентувалися, доповідалися і обговорювалися на ряді міжнародних та всеукраїнських наукових з'їздів, конференцій, симпозіумів, салонів таких як: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2002-2005, 2007-2012, 2014-2018 р.р.); «Новое время» (Севастополь, 2006 і 2007 р.р.); 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (Санкт-Петербург, Російська Федерація, 2008 р.); 12-th International Scientific and Engineering Conference on Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery (Перемишль, Польща, 2008 р.); 3rd and 5th International Conference «Nonlinear Dynamics – 2010 and 2016» (Харків, 2010 і 2016 р.р.); «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, 2008 і 2012 р.р.); Дев'ятий та Дванадцятий міжнародні симпозіуми українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2009 і 2015 р.р.); III, IV, IX університетські науково-

практичні студентські конференції магістрантів НТУ «ХПІ» (Харків, 2009, 2010 і 2015 р.р.); «Современные технологии в газотурбостроении» (Алушта, 2009, 2010, 2011 і 2012 р.р.); «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (Харків, 2009 і 2012 р.р.); «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» (Харків, 2009 р.); «Міцність матеріалів та елементів конструкцій» (Київ, 2010 р.); «Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні» (Київ, 2011 і 2014 р.р.); «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми, 2015 р.); «Вібрації в техніці та технологіях» (Львів, 2014 р., Дніпропетровськ, 2015 р. та Вінниця, 2017 р.).

Публікації. Основні результати роботи опубліковано в 90 (з них в 52 одноосібних) наукових працях, з яких 45 публікацій в наукових фахових виданнях України та інших держав (21 публікація в журналах і 24 – в збірниках наукових праць, з них 9 публікацій у виданнях іноземних держав або у виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз), 43 публікації в тезах і матеріалах конференцій та 2 патенти на винахід, з яких 1 зарубіжний.

Структура і обсяг дисертації. Робота складається з анотацій, вступу, 5-ти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг включає 601 сторінку, на яких 273 рисунка – 206 рисунків в тексті, 67 рисунків на 38 окремих сторінках, 32 таблиці – 31 таблиця в тексті, 1 таблиця на 1 окремій сторінці (основна частина – 342 сторінки, з них на 24 окремих сторінках 41 рисунок і 2 таблиці), список 489 використаних джерел на 52 сторінках, 9 додатків на 196 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено інформацію про історичні, наукові, практичні та технологічні питання, що стосуються теми дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну цінність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, охарактеризовано новизну і практичну значимість наукових результатів, представлено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, наведено інформацію про апробацію роботи та публікацію основних результатів.

У **першому розділі** розглянуто історію, актуальні проблеми, теоретичні основи, підходи, методи і засоби аналізу явищ роторної динаміки з урахуванням традиційних і магнітних підшипників. Виконано детальний огляд літературних джерел і дана оцінка сучасного стану питань, що відносяться до роторної динаміки, з урахуванням використання в роторних системах різних типів підшипників. Проаналізовано причини виникнення різних типів вібрацій в роторних машинах і варіанти їх прояву в залежності від особливостей системи, способи ідентифікації цих вібрацій і підходи до динамічного аналізу. Основну увагу приділено одному з нових типів підшипників – магнітному підшипнику. Для цього виду опор роторів виконано оглядові дослідження, присвячені класифікації існуючих типів, вивченню особливостей їх застосування в різних роторних машинах. Проведено аналіз джерел виникнення і способів математичного опису різних динамічних явищ, можливих в системах із застосуванням МП. Особливу увагу приділено питанням нелінійної динаміки. Визначено та систематизовано основні актуальні теми наукових досліджень в області моделювання динамічної поведінки роторних систем з МП. Зроблено вибір перспективних на-

прямків досліджень, які мають наукову новизну і практичну цінність в області моделювання динамічних процесів в системах з МП, сформульовано їх цілі і завдання.

В даному розділі також зазначено, що насамперед задача відшукування критичних швидкостей та інших можливих резонансних режимів ставиться в ході математичного моделювання динамічної поведінки роторних систем. Підкреслено, що починаючи з перших спроб опису процесів, що відбуваються в таких системах, зроблених К. Лавалем, А. Стодолой, А. Фьоппем, Є. Ніколаї та іншими вченими XIX століття, теорія роторної динаміки отримала на даний момент широкий розвиток. Звичайно ж, методи і підходи до опису роторної динаміки, ґрунтуються на загальній теорії коливань. Тут виділено роботи таких вітчизняних авторів як Л.І. Мандельштам, Б.В. Булгаков, Я.Г. Пановко, Ю.О. Митропольский, А.П. Філіпов, Є.Г. Голоскоков, І.М. Бабаков, А.С. Вольмир, С.П. Тимошенко, Г.С. Писаренко, В.В. Матвеев, А.П. Зіньковський, В.В. Болотін, І.І. Блехман, Ф.М. Диментберг, Ю.І. Неймарк, М.Ф. Диментберг, В.В. Мігулін. Серед зарубіжних увагу звернуто на роботи авторів: А.В. Pippard, R.L. Halfman, С.М. Harris, А. Sinha. Окремо виділено роботи по коливанням і динаміці абсолютно твердих тіл, яким є ротор при коливаннях на пружних опорах за першими формами. Тут як відомі зазначено праці таких вчених як А.І. Лурье, Р.Ф. Ганієв, В.О. Кононенко, J. Wittenburg, E.J. Routh, Н.І. Амелькин, А.В. Борисов.

Визначено, що динаміка роторів при наявності нелінійних елементів або особливостей, які призводять до прояву нелінійних ефектів, не може адекватно моделюватися за допомогою підходів лінійної теорії коливань, і тому необхідно застосування в цьому випадку нелінійних теорій і методів. Тут зазначено найбільш значущі роботи таких авторів як Ю.О. Митропольский, Н.Г. Бондарь, В.О. Кононенко, В.І. Гуляєв, М.В. Закржевський, Н.В. Бутенін, Ю.І. Неймарк, О.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, І.І. Блехман, Р.Ю. Бансявичус, К.М. Рагульскіс, В.М. Матросов, К.В. Аврамов, Ю.В. Міхлін, а також Ch. Hayashi, A. Tondl, G. Schmidt, D.G. Fertis, A. Scott та ін.

Відзначено, що моделювання динамічної поведінки будь-якої роторної системи має базуватися на досягнутих теоретичних і практичних результатах. З вітчизняних виділено праці, присвячені основам, поняттям, принципам і методам аналізу коливань валів і роторів таких авторів, як А.В. Дабагян, Ф.М. Диментберг, О.Ф. Гуров, А.П. Філіпов, Є.Г. Голоскоков, С.П. Тимошенко, І.М. Бабаков, Г.С. Маслов, Д.В. Хронін, С.І. Сергеев, А.О. Гусаров, К.М. Рагульскіс, А.С. Кельзон, Я.Г. Пановко, Р.Ф. Ганієв, В.О. Кононенко, Е.Л. Позняк, С.І. Богомоллов, А.М. Журавльова, В.О. Жовдак, Ю.С. Воробйов, М.Г. Шульженко, В.А. Марцинковський, В.І. Симоновський та ін.

На додаток до них розвиток зарубіжної школи простежено за роботами таких авторів: A. Stodola, W.K. Wilson, A. Tondl, J.S. Rao, J.M. Vance, F.F. Ehrich, D. Childs, E. Kramer, M. Lalanne, G. Genta, M.L. Adams Jr., T. Yamamoto, В.Г. Луканенко, R. Gasch, W. Chen, A. Muszynska, M.I. Friswel, А.М. Александров, А.А. Иноземцев та ін.

Крім того зазначено, що різні принципи управління електромеханічними системами викладені в роботах таких вітчизняних і зарубіжних авторів як: Н.Т. Кузовков, Б.К. Чемоданов, Я.З. Цыпкин, Н. Kwakernaak, R. Sivan, Е.П. Попов, В.А. Бесекерский, В.І. Гостев, А.А. Воронов, Ю.А. Борцов, Л.Н. Волгин, Д.А. Новиков, Є.Є. Александров, Б.І. Кузнецов, А.А. Колесников, А.А. Красовский та ін.

Також проаналізовано безліч монографій, статей, матеріалів конференцій, які

стосуються питань розробки, впровадження та математичного опису магнітних підшипників різних типів, систем та алгоритмів керування АМП, а також існуючих підходів до моделювання динаміки роторів в МП [37].

Визначено, що раніше для опису динаміки роторів в АМП та ПМП використовувалися лінеаризовані математичні моделі, засновані на спрощених схемах, яка, наприклад для радіального АМП наведена на рис. 1. Тоді коливання описуються одним рівнянням для кожної узагальненої координати (1), де сумарна магнітна сила в напрямі x дорівнює (2). При лінеаризації на основі струмів зміщення I_b магнітна сила набуває вигляду (3), де коефіцієнт при x – «негативна» жорсткість підвісу, а при

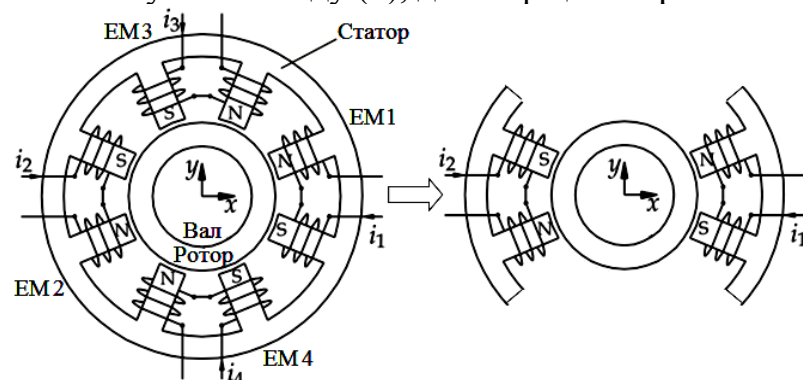


Рисунок 1 – Приведення радіального восьмиполусного АМП з чотирма електромагнітами (ЕМ) до спрощеної схеми

Такий лінеаризований підхід застосовувався до моделювання динаміки роторів в АМП на початкових етапах, але навіть він був неприйнятний для стійкого управління при неканонічному виборі струмів зміщення. Крім того, виявилось, що поведінка систем «ротор в АМП» істотно відрізняється від одержуваних рішень на основі лінеаризованих рівнянь. Тому для аналізу нелінійних ефектів раніше застосовувалися рівняння (1) зі значенням сили (2). Насправді залежності магнітних сил як для ПМП, так і для АМП, в межах повного зазору носять істотно нелінійний характер. Далі в роботі за допомогою числових досліджень показано і за допомогою лабораторних експериментів підтверджено, що в подібних системах можуть і практично завжди (з великою часткою ймовірності) проявляються нелінійні ефекти.

У другому розділі «Побудова математичних моделей для опису динаміки роторів в магнітних підшипниках різних типів» досягнуто фундаментальні цілі, сформульовані в роботі, і вирішено окремі задачі з розробки теоретичних і практичних підходів до моделювання динамічних процесів, що відбуваються в роторних системах з магнітними підшипниками різних типів.

Розроблено маючий наукову новизну загальний спосіб математичного опису динаміки обертових роторів в повних магнітних підвісах, реалізованих застосуванням комбінацій активних і пасивних магнітних підшипників, який має низку переваг у порівнянні з існуючими, тому що враховує повноту нелінійного взаємозв'язку між механічними, магнітними та електричними процесами, що відбуваються в системі. Він дає можливість моделювання більшості практично значимих фізичних, конструктивних і функціональних особливостей, в тому числі безперервних або дискретних керуючих діянь, що виробляються системами автоматичного управління АМП. В основу цього підходу покладено диференціальні рівняння Лагранжа-Максвелла у

різниці струмів $(i_1 - i_2)$ – «струмова» жорсткість, δ_r – номінальний зазор; S_p – площа полюсів; w – кількість витків обмоток; μ_0 – магнітна стала.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_{Mx} = m \omega^2 e \cos(\omega t). \quad (1)$$

$$F_{Mx} = \frac{\mu_0 w^2 S_p}{4} \left[\frac{i_2^2}{(\delta_r - x)^2} - \frac{i_1^2}{(\delta_r + x)^2} \right]. \quad (2)$$

$$F_{Mx} = -\frac{\mu_0 w^2 S_p I_b^2}{\delta_r^3} x + \frac{\mu_0 w^2 S_p I_b}{2\delta_r^2} (i_2 - i_1). \quad (3)$$

формі, аналогічній рівнянням Рауса в механіці [19]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_j} = -\frac{\partial W}{\partial q_j} + Q_j, & (j = 1, \dots, M); \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial t} + \sum_{s=1}^N r_{Cks} \frac{\partial W}{\partial \Psi_s} = E_k, & (k = 1, \dots, N), \end{cases} \quad (4)$$

де T – кінетична енергія; Π – потенційна енергія; D – дисипативна функція; q_j – узагальнені механічні координати; Q_j – непотенційні узагальнені сили; M – число узагальнених механічних координат; $W=W(\Psi_1, \dots, \Psi_N, q_1, \dots, q_M)$ – енергія магнітного поля; Ψ_k – потоки індукції (потокозчеплення), r_{Cks} – активні опори електричних контурів, E_k – алгебраїчна сума сторонніх електрорушійних сил; i_k – контурні струми; N – число замкнутих нерозгалужених контурів; доданки $-\partial W/\partial q_j$ є пондеромоторні сили, тобто узагальнені сили, обумовлені механічним впливом електромагнітного поля; $L_{ks}=L_{ks}(q_1, \dots, q_M)$ – коефіцієнти само- і взаємоіндукції контурів; L_{ks}^{-1} – елементи матриці зворотної до матриці з коефіцієнтами L_{ks} , причому:

$$\Psi_k = \frac{\partial W}{\partial i_k} = \sum_{s=1}^N L_{ks} i_s; \quad i_s = \frac{\partial W(\Psi_1, \dots, \Psi_N, q_1, \dots, q_M)}{\partial \Psi_s} = \sum_{k=1}^N L_{ks}^{-1} \Psi_k, \quad (s = 1, \dots, N). \quad (5)$$

При цьому диференціальні рівняння, що описують електромагнітну частину системи, доповнюють диференціальні рівняння руху. Основними перевагами такого способу моделювання роторної динаміки систем з МП є врахування нелінійних ефектів і можливість моделювання специфічних, в тому числі нелінійних явищ.

Для цього при отриманні виразу для кінетичної енергії жорсткого ротора в МП

$$T = \frac{1}{2} [mv_0^2 + 2m(v_0 \times \omega) \cdot r'_C + \omega \Theta^0 \omega], \quad (6)$$

де m – загальна маса ротора з диском; точка C – центр інерції (мас); v_0 – швидкість полюса O ; ω – кутова швидкість тіла; r'_C – радіус-вектор OC (або OO^0) центру інерції тіла в системі рухомих осей, що мають початок в полюсі O ; Θ^0 – тензор інерції тіла в цій точці, застосовується просторова розрахункова схема обертового абсолютно жорсткого ротора (рис. 2), вводяться три праві прямокутні системи координат, а розміщення рухомої системи $O\xi\eta\zeta$ по відношенню до нерухомої O^*xuz визначається координатами x_0, y_0, z_0 її полюса O (або радіус вектором $r_0=O^*O$) і кутами, що визначають положення $O\xi\eta\zeta$ по відношенню до O^*xuz .

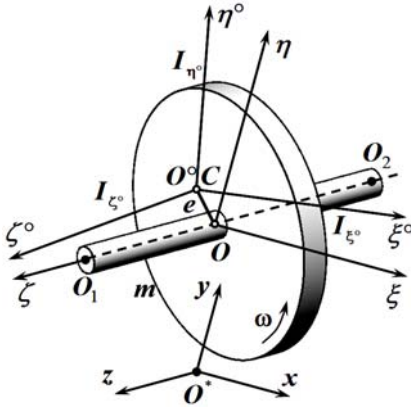


Рисунок 2 – Просторова розрахункова схема обертового абсолютно жорсткого ротора

Перехід від кутів Ейлера до кутів нахилу осі ротора до координатних осей θ_x, θ_y , а також застосування співвідношень між координатами особливих точок ротора дозволяє для визначення положення ротора крім першої групи узагальнених координат $q_0=(x_0, y_0, z_0, \theta_x, \theta_y)$ використовувати другу – $q=(x_1, y_1, x_2, y_2, z_3)$ – координати точок O_1 і O_2 (рис. 2) в нерухомій системі координат (наприклад, центрів опорних ділянок ротора в радіальному напрямі) і координата z певної точки O_3 , розташованої на осі ротора (наприклад, центру опорної ділянки ротора в осьовому напрямі).

При побудові узагальненої силової функції нелінійних потенційних сил U або потенційної енергії Π враховується характер розв'язуваної задачі, а також те, що для

коректного опису нелінійних коливань необхідно, щоб структура нелінійних сил поля була адекватна структурі нелінійних сил інерції (як, наприклад, при вирішенні задачі про лінійні коливання достатньо як силову функцію обрати вираз потенційної енергії у вигляді однорідної квадратичної форми). Структура нелінійних сил інерції описується складними тригонометричними виразами з нелінійним взаємозв'язком між усіма шістьма узагальненими координатами і їх похідними, для яких неможливий поділ змінних. Однак для отримання розв'язку з прийнятною точністю рівняння руху можуть бути приведені до квазілінійного вигляду, і тоді використання наближених методів аналізу систем з малою нелінійністю дозволить дослідити основні ефекти нелінійних коливань ротора в магнітних підшипниках, в тому числі нелінійні резонанси. Для переведення рівнянь руху в квазілінійний вид можна скористуватися розкладанням тригонометричних функцій в степеневі ряди.

Тоді, приймаючи, що магнітний підвіс ротора здійснюється за допомогою ПМП та/або АМП за всіма ступенями свободи, та утримуючи доданки першого, другого та третього степеня відносно узагальнених координат та їх похідних, приходимо до пов'язаної системи диференціальних рівнянь (СДР) при $M=5$ відносно спочатку першої групи координат q_0 , а потім і другої – q . Причому зважаючи на те, що вираз для магнітної енергії АМП W в більшості випадків природно залежить від q , а не від q_0 , та враховуючи, що для розв'язання система диференціальних рівнянь має бути записана відносно однієї групи координат, надалі для моделювання застосовується саме СДР відносно узагальнених координат q :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{ml_2^2 + J_1}{l^2} \right) \ddot{x}_1 + \left(\frac{ml_1 l_2 - J_1}{l^2} \right) \ddot{x}_2 + \frac{\omega J_3}{l^2} (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + b_{x_1} \dot{x}_1 + f_{x_1}'' + f_{x_1}''' = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} - \frac{\partial W}{\partial x_1} + Q_{x_1} + H_{x_1}(t); \\ \left(\frac{ml_1^2 + J_1}{l^2} \right) \ddot{x}_2 + \left(\frac{ml_1 l_2 - J_1}{l^2} \right) \ddot{x}_1 - \frac{\omega J_3}{l^2} (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + b_{x_2} \dot{x}_2 + f_{x_2}'' + f_{x_2}''' = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} - \frac{\partial W}{\partial x_2} + Q_{x_2} + H_{x_2}(t); \\ \left(\frac{ml_2^2 + J_1}{l^2} \right) \ddot{y}_1 + \left(\frac{ml_1 l_2 - J_1}{l^2} \right) \ddot{y}_2 - \frac{\omega J_3}{l^2} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + b_{y_1} \dot{y}_1 + f_{y_1}'' + f_{y_1}''' = -\frac{\partial \Pi}{\partial y_1} - \frac{\partial W}{\partial y_1} + Q_{y_1} + H_{y_1}(t); \\ \left(\frac{ml_1^2 + J_1}{l^2} \right) \ddot{y}_2 + \left(\frac{ml_1 l_2 - J_1}{l^2} \right) \ddot{y}_1 + \frac{\omega J_3}{l^2} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + b_{y_2} \dot{y}_2 + f_{y_2}'' + f_{y_2}''' = -\frac{\partial \Pi}{\partial y_2} - \frac{\partial W}{\partial y_2} + Q_{y_2} + H_{y_2}(t); \\ m\ddot{z}_3 + b_{z_3} \dot{z}_3 + f_{z_3}'' + f_{z_3}''' = -\frac{\partial \Pi}{\partial z_3} - \frac{\partial W}{\partial z_3} + Q_{z_3} + H_{z_3}(t); \\ \frac{\partial \Psi_{c1}}{\partial t} + r_{c1} \frac{\partial W}{\partial \Psi_{c1}} = u_{c1}(x_1, \dots, z_3, \dot{x}_1, \dots, \dot{z}_3, i_1, \dots, i_N); \\ \frac{\partial \Psi_{cN}}{\partial t} + r_{cN} \frac{\partial W}{\partial \Psi_{cN}} = u_{cN}(x_1, \dots, z_3, \dot{x}_1, \dots, \dot{z}_3, i_1, \dots, i_N), \end{array} \right. \quad (7)$$

де m – маса ротора; J_1 і J_3 – екваторіальний і полярний моменти інерції ротора; l_1 і l_2 – відстань від центрів опорних ділянок радіальних МП до центру мас ($l_1 + l_2 = l_2$); $f''_{qj}(x_1, \dots, z_3)$, $f'''_{qj}(x_1, \dots, z_3, e_1, \dots, \gamma_2)$ – нелінійні доданки рівнянь руху, зумовлені силами інерції і потенційного поля другого і третього степеня, причому переміщення ротора і лінійні параметри незрівноваженості e_1 , e_2 малі і мають такий же порядок малості, як і зазор в підшипниках δ_r , а кутові параметри незрівноваженості γ_1 , γ_2 одного порядку малості з максимально можливим, виходячи з геометричних обмежень,

кутом повороту ротора; b_{x_1, \dots, z_3} – коефіцієнти в'язкості; ω – кутова швидкість; $r_{c_1, \dots, N}$ – активні опори в ланцюгах обмоток; $u_{c_1, \dots, N}$ – керуючі напруги, що подаються на обмотки АМП, величина яких формується відповідно до прийнятого закону управління в залежності від поточного положення ротора, його швидкості та струмів в обмотках електромагнітів АМП або тільки від деяких з цих параметрів; N – кількість обмоток електромагнітів АМП (керованих електромагнітних контурів); Q_j – непотенціальні узагальнені сили; $H_q(t)$ – сили, які явно залежать від часу, а саме зовнішні періодичні навантаження, викликані динамічною незрівноваженістю ротора:

$$\begin{aligned} H_{x_1}(t) &= [ml_2\omega^2(e_1 \cos(\omega t) - e_2 \sin(\omega t)) + \omega^2(J_1 - J_3)(\gamma_1 \sin(\omega t) + \gamma_2 \cos(\omega t))]/l; \\ H_{x_2}(t) &= [ml_1\omega^2(e_1 \cos(\omega t) - e_2 \sin(\omega t)) - \omega^2(J_1 - J_3)(\gamma_1 \sin(\omega t) + \gamma_2 \cos(\omega t))]/l; \\ H_{y_1}(t) &= [ml_2\omega^2(e_1 \sin(\omega t) + e_2 \cos(\omega t)) - \omega^2(J_1 - J_3)(\gamma_1 \cos(\omega t) - \gamma_2 \sin(\omega t))]/l; \\ H_{y_2}(t) &= [ml_1\omega^2(e_1 \sin(\omega t) + e_2 \cos(\omega t)) + \omega^2(J_1 - J_3)(\gamma_1 \cos(\omega t) - \gamma_2 \sin(\omega t))]/l, \end{aligned} \quad (8)$$

члени другого порядку мають вигляд:

$$\begin{aligned} f_{x_1}''(x_1, \dots, \ddot{z}_3, e_1, e_2) &= m\ddot{z}_3(-e_1 \cos \omega t + e_2 \sin \omega t)/l; \quad f_{y_1}''(x_1, \dots, \ddot{z}_3, e_1, e_2) = m\ddot{z}_3(-e_1 \sin \omega t - e_2 \cos \omega t)/l; \\ f_{x_2}''(x_1, \dots, \ddot{z}_3, e_1, e_2) &= m\ddot{z}_3(e_1 \cos \omega t - e_2 \sin \omega t)/l; \quad f_{y_2}''(x_1, \dots, \ddot{z}_3, e_1, e_2) = m\ddot{z}_3(e_1 \sin \omega t + e_2 \cos \omega t)/l; \\ f_{z_3}''(x_1, \dots, \ddot{z}_3, e_1, \dots, \gamma_2) &= \left([(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1) - \omega^2(x_2 - x_1) + 2\omega(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)](e_1 \cos \omega t - e_2 \sin \omega t) + \right. \\ &\quad \left. + [(\ddot{y}_2 - \ddot{y}_1) - \omega^2(y_2 - y_1) - 2\omega(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)](e_1 \sin \omega t + e_2 \cos \omega t) \right)/l. \end{aligned} \quad (9)$$

Члени третього порядку малості відносно узагальнених координат, їх похідних та параметрів незрівноваженості e_1, \dots, γ_2 зважаючи на громіздкість записів тут не наводяться, але саме в них спостерігається взаємозв'язок між усіма координатами [19].

Робота більшості роторних машин в разі застосування різних пружно-демпферних опор припускає знаходження діапазону робочих обертів обертання між трансляційними критичними режимами, коли ротор здійснює прецесійний рух як абсолютно тверде тіло, і деформаційними критичними швидкостями, при яких пружна вісь вала здійснює згинальні коливання. Це відбувається внаслідок того, що при проектуванні роторних машин зниження віброактивності і віброперевантажень забезпечується за допомогою ефекту самоцентрування ротора, що настає в зарезонансній області. Оскільки всі ці положення справедливі і для роторів, встановлених в магнітних підшипниках, які є окремим випадком ПДО, то для виконання аналізу динамічного стану таких роторних систем при виході їх на номінальні режими роботи або при зупині цілком достатньо математичних моделей, в яких ротор розглядається

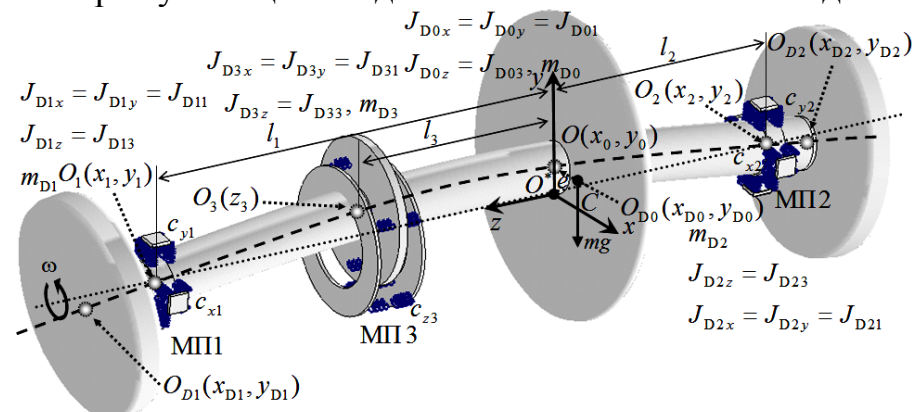


Рисунок 3 – Розрахункова схема гнучкого ротора в МП

як абсолютно тверде тіло. Але для аналізу динаміки гнучких роторів в магнітних підшипниках в роботі запропоновано розрахункову схему (рис. 3) гнучкого ротора в МП та способи математичного опису із застосуванням дискретного з зосередженими параметрами та континуального підходів.

Така схема дозволяє з деякими спрощеннями моделювати ротори більшості турбомашин, таких як: компресори, у яких робочі колеса розташовуються усередині між опорами, а напівмуфти консольно; детандери, у яких є одне консольно розташоване робоче колесо; електрошпинделі з таким же розташуванням робочого колеса; детандер-компресорні агрегати з двома консольними робочими колесами тощо. Врахування ПМП і АМП засновано на тих же принципах, що і для жорсткого ротора.

Запропоновано аналітичний спосіб знаходження виразів магнітної енергії W і сил в АМП з урахуванням законів управління для включення їх в математичну модель (7) [22, 64]. Цей спосіб засновано на побудові еквівалентних схем заміщення і застосуванні методу контурних потоків для аналізу магнітних кіл АМП, що дає можливість врахування потоків розсіювання і магнітних опорів ділянок магнітопроводів АМП та забезпечує не критичність математичної моделі до виникнення «нульових» зазорів і струмів, тим самим розширюючи її область визначення практично до меж повного повітряного зазору. Пропонований спосіб формування виразу магнітної енергії АМП призводить до того, що в вирази магнітних опорів ділянок кола магнітопроводів АМП та повітряних зазорів входять і константи, що визначаються їх геометрією, і величини самих зазорів, а значить і узагальнені механічні координати q . Причому залежність від них є нелінійною. Крім того, магнітна енергія квадратично залежить від усіх потокозчеплень Ψ . Такий вид виразу магнітної енергії $W=W(\Psi_1, \dots, \Psi_N, x_1, \dots, z_3)$ зв'язує в єдину систему рівняння руху і рівняння відносно потокозчеплень (7) і визначає взаємозв'язок електричних і магнітних динамічних явищ з механічними.

В системах диференціальних рівнянь (7) доданки $-\partial W/\partial q_j$ є електромагнітні сили в АМП, які залежать від координат q і струмів в обмотках електромагнітів i_k , а значить, і потокозчеплень Ψ_k . Доданки $-\partial \Pi/\partial q_j$ є потенційні сили. У разі використання в роторній системі ПМП – це магнітні сили, які залежать тільки від зсуву ротора. Для отримання залежностей цих сил запропоновано числові скінченноелементні методи визначення параметрів, їх залежностей і аналітичних виразів величин, що входять в систему нелінійних диференціальних рівнянь (7), таких як силові і жорсткісні характеристики ПМП (а в разі потреби і АМП) практично будь-якої конфігурації і конструктивного виконання [10, 14, 21]. Їх застосування дозволяє виконувати числові експерименти з підтвердження достовірності аналітичних виразів цих величин, отриманих іншими способами без виконання натурних експериментів, що значно скорочує трудомісткість побудови точних математичних моделей.

Для реалізації запропонованих числових методик створено розрахунковим і експериментальним чином верифіковані розрахункові засоби знаходження силових характеристик пасивних і активних радіальних і осьових магнітних підшипників, які дозволяють отримувати аналітичні залежності, адаптовані до використання в математичних моделях динаміки роторів [10, 23]. Автоматизація розрахунків за допомогою даних програмних засобів дозволяє здійснювати адаптивний пошук найбільш раціональних або оптимальних наборів параметрів магнітних підшипників, що забезпечують їх необхідні характеристики.

Крім того, для попередньої оцінки динамічних властивостей роторних систем і машин з магнітними підшипниками або пружно-демпферними опорами інших типів

створено програмний засіб, який є інтегрованим з пакетом інженерного аналізу [30, 69]. Його застосування дозволяє виконувати первинний аналіз роторної динаміки в лінійній постановці для визначення основних динамічних характеристик, таких як власні частоти і форми коливань, критичні швидкості обертання, амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) з відображенням траєкторій руху точок пружної осі вала. Основною метою такого аналізу є визначення і вибір вихідних даних для проведення уточненого розрахункового дослідження, наприклад, таких як досліджуваний частотний діапазон і крок за частотою для згущення поблизу очікуваних резонансів.

Для проведення уточненого аналізу роторної динаміки з урахуванням нелінійностей на підставі запропонованого способу формування математичних моделей динаміки роторів в магнітних підвісах створена нелінійна імітаційна обчислювальна модель динаміки роторів, встановлених в пасивних та/або активних магнітних підшипниках (ІОМ-ДРМП-Н) [7, 15, 20, 88]. Так, в математичних і імітаційній моделях враховуються такі нелінійності як: нелінійні залежності магнітних сил від зазорів в пасивних і активних магнітних підшипниках і від струмів в обмотках електромагнітів; нелінійності, пов'язані з індуктивністю котушок; геометричний зв'язок між електромагнітами одного АМП та зв'язок між усіма АМП одного ротора, який призводить до зв'язаності процесів в ортогональних напрямках та інші. Використання цієї моделі дозволяє підвищити достовірність розрахункового визначення параметрів роторів, магнітних підшипників і систем управління АМП, що дає можливість істотного скорочення обсягу експериментальних досліджень.

Таким чином, запропонований у другому розділі підхід до моделювання динамічної поведінки роторів турбомашин з магнітними підшипниками різних типів дозволяє комплексно і всебічно усунути недоліки існуючих математичних моделей динаміки роторів в МП і врахувати всі практично значимі види і причини нелінійного поведінки системи «ротор в МП», визначені в ході аналізу сучасного стану проблеми. Недоліки попередніх підходів полягають в тому, що лінеаризовані рівняння для струмів, які традиційно використовуються для опису електродинамічної частини системи «ротор в АМП», в граничних режимах, таких як «нульовий струм», «нульовий зазор», насичення та інших, дають значну похибку і практично не відображають процеси, що відбуваються в системі. Це виникає через те, що використовуваний при застосуванні іншої форми запису рівнянь Лагранжа-Максвелла ніж (4) вираз магнітної коенергії W_C , який залежить від струмів в обмотках АМП, представляється як розкладання в ряд Тейлора з невідомими коефіцієнтами. Ці коефіцієнти являють собою коефіцієнти само- і взаємоіндукції (5) і, зважаючи на складність геометрії магнітного кола АМП, визначаються наближено з похибкою до 10%, а іноді і до 50% (при зміщенні цапф ротора близькому до зазору). Це є наслідком неврахування магнітного опору ділянок магнітопроводів статора і ротора, залежності висоти зазору між кожним полюсом АМП і цапфою від просторового положення жорсткого ротора, що визначається п'ятьма ступенями свободи, а також лінеаризації виразів для зазначених коефіцієнтів, що призводить до неврахування взаємовпливу рухів у вертикальному, горизонтальному і осьовому напрямках.

Для уточненого опису нелінійних явищ роторної динаміки в системах з ПМП і АМП вперше запропоновано нову нелінійну математичну модель, що складається з

диференціальних рівнянь руху, в яких зберігаються нелінійні члени сил інерції і потенційного поля, та рівнянь відносно потокозчеплень, які відповідають другому закону Кирхгофа для магнітних кіл і є формою запису закону повного струму для кожного електричного контуру системи (обмотки АМП). Адекватність запропонованого способу моделювання динамічних явищ в роторних системах з МП далі підтверджена збігом розрахункових і експериментальних даних, таких як віброграми руху опорних ділянок ротора при різних швидкостях обертання, траєкторії руху, АЧХ і залежності амплітуд кратних гармонік від кутової швидкості обертання та тривимірних спектрів для спеціально розробленої лабораторної моделі ротора в ПМП і АМП.

Побудова повних магнітних підвісів роторів вимагає наявності АМП, які чи то здійснюють стійкий до діянь підвіс за всіма п'ятьма ступенями свободи ротора як твердого тіла, чи то хоча б по одній при наявності самоцентрованих пасивних МП для обпирання в напрямках інших ступенів свободи. Принцип дії АМП передбачає використання систем автоматичного регулювання (САР), що забезпечують вироблення керуючих діянь в залежності від поточного положення ротора та/або швидкості його руху, а також миттєвих струмів в обмотках силових елементів (електромагнітів) АМП.

У третьому розділі «Фізична реалізація систем управління і контролю динамічних характеристик роторних систем з магнітними підшипниками» досягнуто ключові цілі, визначені в роботі, і вирішено окремі задачі, які стосуються розробки способу і алгоритму дискретного управління АМП, фізичної реалізації в лабораторній установці комбінованого пасивно-активного магнітного підвісу ротора, реалізованого за рахунок адаптації цього способу в створеній аналоговій системі управління (СУ), а також проведення за допомогою створеного програмно-апаратного вимірювального комплексу серії експериментів з вивчення динамічної поведінки ротора в МП, результати яких є придатними для верифікації запропонованих математичних моделей і підтвердження їх переваг при описі різних явищ.

Розроблено маючий новизну запатентований спосіб дискретного управління активними магнітними підшипниками [89, 90, 49, 50], який дозволяє виробляти керуючі сигнали, що подаються на силові виконавчі електромагніти, в залежності не тільки від переміщень всіх контрольних точок ротора, а й від швидкостей їх руху, а також миттєвих значень струмів в котушках цих ЕМ. Його основною відмінною рисою, що надає практичну привабливість, пов'язану з економічністю, є «релейність» роботи. Вона передбачає прийняття рішення про подачу напруги на кожен котушку в фіксовані рівновіддалені моменти часу, які визначаються дискретно обраним періодом управління. Причому бінарний вектор-стовпець управління формується на підставі всіх значень вектор-стовпця стану системи шляхом відпрацювання розгалуженого алгоритму, який передбачає виконання тільки логічних операцій, тобто операцій порівняння поточних значень із заздалегідь визначеними оптимальними значеннями порогових рівнів. Такий підхід реалізує один з різновидів широтно-імпульсної модуляції сигналів. Він дозволяє домогтися підвищення надійності систем управління, збільшення їх швидкодії і економічності за рахунок застосування імпульсного живлення котушок з обмотками управління, а також розширення діапазону стійкості САР по відношенню до різних діянь шляхом створення самоналагоджуваної системи управління.

На основі методу дискретного управління реалізовано систему автоматичного управління осьовим упорним активним магнітним підшипником, тобто двома електромагнітами з броньованими сердечниками і коаксіальними обмотками, що забезпечують двосторонню дію сумарної осрової магнітної сили. Структурну схему системи управління осьового АМП представлено на рис. 4. Адаптація способу виконана за рахунок використання імпульсного режиму роботи в аналоговій схемі управління. При цьому жорсткість обпирання визначається проміжками часу на кожному періоді управління, на яких відбувається одночасне включення обох електромагнітів. Перевагами даної системи управління є досить прийнятна швидкодія, простота настройки, економічність, а також універсальність і придатність для різних варіантів як осьових, так

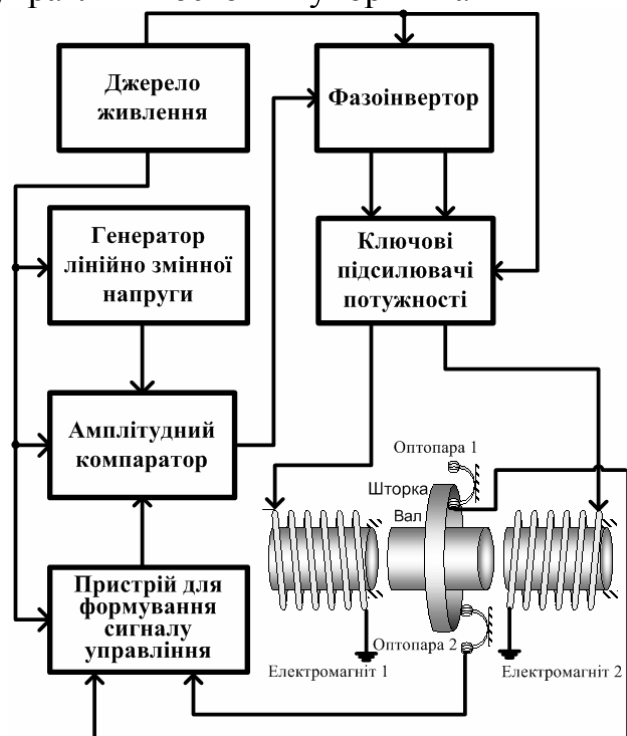


Рисунок 4 – Структурна схема СУ осьового АМП і радіальних АМП.

З використанням даної системи управління розроблено і фізично реалізовано лабораторну установку за схемою повного магнітного підвісу горизонтального ротора комбінованого магнітно-електромагнітного типу. Її вигляд із зображенням блоків живлення, управління і посилення потужності надано на рис. 5. У ній в якості двох радіальних опор використано пасивні магнітні підшипники на двох постійних кільцевих магнітах (МППКМ) з освоюю намагніченістю, а в якості осрової опори – АМП, в функціоналі якого використано зазначені спосіб і СУ. Дана лабораторна установка є прототипом магнітного підвісу роторів турбодетандерів або детандер компресорних агрегатів малих і середніх розмірів або будь-яких інших роторних систем і машин з розташованими консольно робочими колесами.

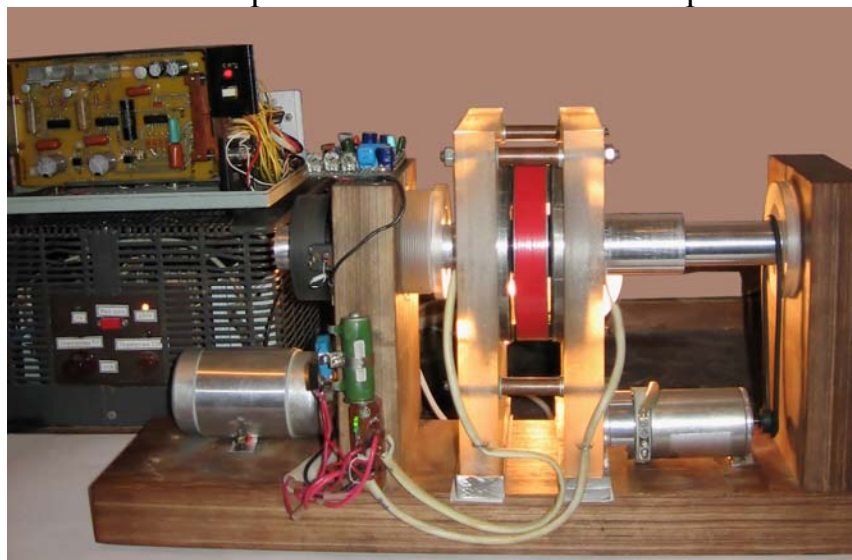


Рисунок 5 – Зовнішній вигляд лабораторної установки

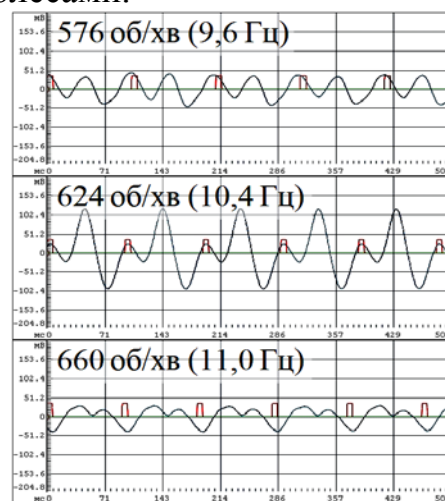


Рисунок 6 – Осцилограми вертикального руху опорної ділянки ротора правого радіального ПМП

При проведенні експериментів осцилограми руху правої опорної ділянки ротора в вертикальному напрямі фіксувалися дискретно для обраних значень швидкості обертання ротора в діапазоні від 0 до 3000 об/хв (рис. 6). Це дозволило з достатньою точністю за значенням амплітуд коливань визначити значення критичних швидкостей обертання, які відповідають коливанням ротора як абсолютно твердого тіла. Прямокутна мітка на рис. 6 є сигналом з датчика обертів, яка дозволяє оцінити частоту обертання. Ці попередні експерименти дозволили підтвердити працездатність запропонованих способу і алгоритмів дискретного управління, а також системи управління осьовим АМП з імпульсним живленням електромагнітів, а також зробити висновок про наявність в системі нелінійних динамічних явищ.

Для проведення лабораторних експериментальних досліджень вібраційних характеристик роторів в магнітних підшипниках і вивчення різних явищ роторної динаміки в системах з магнітними підшипниками різних типів, а також ідентифікації явищ, пов'язаних із застосуванням магнітних підшипників, розроблено програмно-апаратний комплекс, апаратна частина якого дозволяє підключати різні типи датчиків механічних величин і виконувати вимірювання сигналів, що характеризують вібропереміщення, з максимальною швидкістю дискретизації до 350 кГц. Програмні засоби комплексу забезпечують можливість настройки, зберігання, завантаження і обробки даних, для реалізації яких доступні як стандартні модулі аналізу, так і спеціально розроблені. При цьому мобільність комплексу визначається тільки особливістю використовуваної ЕОМ, а портативним він може вважатися при використанні сучасних персональних комп'ютерів класу Notebook. Створений програмно-апаратний комплекс протестовано при аналізі динаміки ротора лабораторної моделі з комбінованими магнітними підшипниками. Дані, отримані в ході експериментальних досліджень, використані для настройки параметрів системи управління магнітним підвісом з метою збільшення стійкості ротора на режимах, близьких до резонансних.

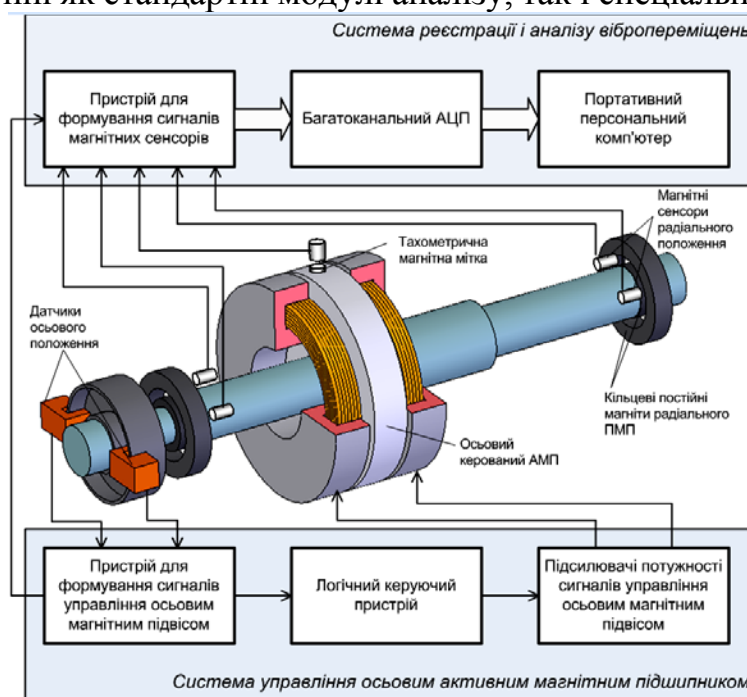


Рисунок 7 – Структурна схема системи реєстрації та аналізу вібропереміщень ротора лабораторної установки

З використанням програмно-апаратного вимірювального комплексу виконано серію експериментальних досліджень з вивчення динамічних властивостей лабораторної моделі ротора в магнітних підшипниках пасивного і активного типів, результати яких дозволили модифікувати конструкцію для поліпшення характеристик і зниження амплітуд коливань на резонансних режимах без внесення додаткового демпфування. Так, в ході проведення попередніх експериментальних досліджень на лабораторній установці було виявлено, що причинами нестійкості руху ротора мо-

жуть бути як конструкційні недосконалості (неприпустима величина статичної і моментної незрівноваженості, віддаленість точки вимірювання і управління осевого АМП), так і специфічні фактори, властиві тільки таким системам, наприклад, електромагнітна незрівноваженість, пов'язана з неоднорідністю в окружному напрямі магнітного поля, створюваного осевим АМП. Модифіковану лабораторну установку ротора в МП представлено на рис. 8. Введено позначення: 1 – основа; 2 і 3 – чотири

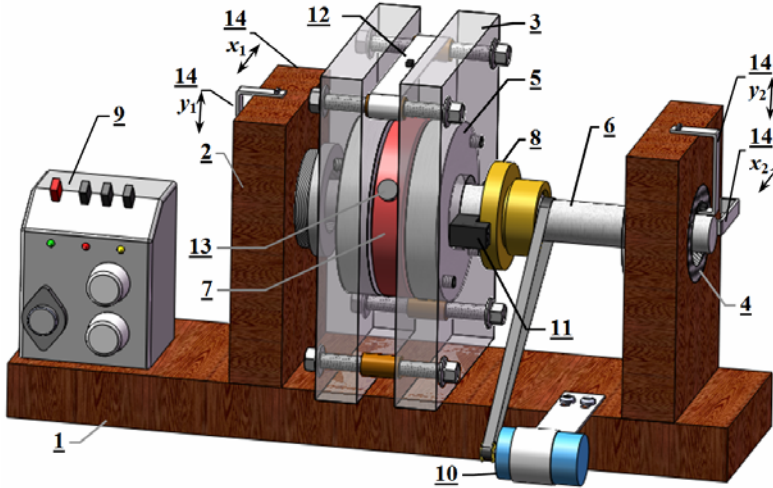


Рисунок 8 – Структурна схема СУ осевого АМП

стійки для кріплення нерухомих кілець радіальних МППКМ 4 і статорів осевого АМП 5; 6 – алюмінієвий вал з феромагнітним диском осевого АМП 7, кільцеві постійні магніти радіальних МППКМ і диск 8 системи реєстрації; 9 – блок управління осевим АМП; 10 – електродвигун; 11 – оптичні датчики осевого положення ротора; частотомір – датчик Холла 12 з керуючим постійним магнітом на роторі 13.

Визначення горизонтальних (x_1 і x_2) і вертикальних (y_1 і y_2) відхилень центрів опорних ділянок ротора в МППКМ виконувалось за допомогою датчиків Холла (14).

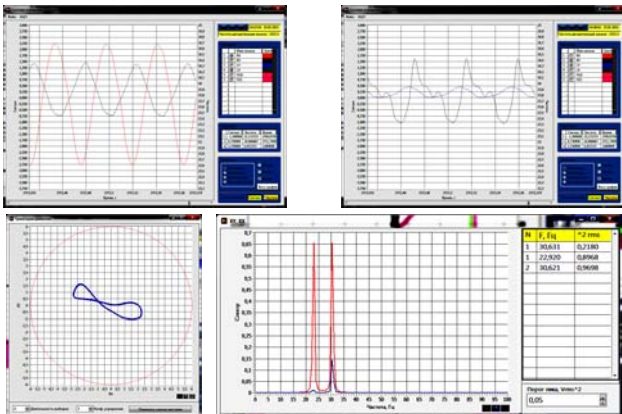


Рисунок 9 – Результати експериментів

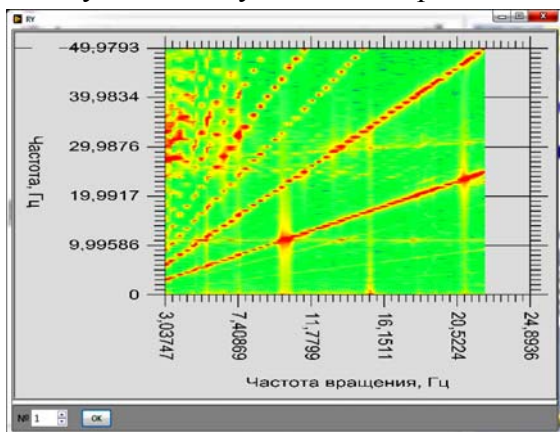
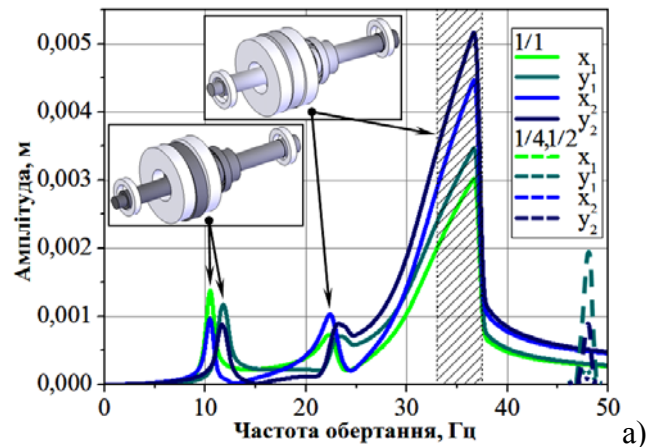
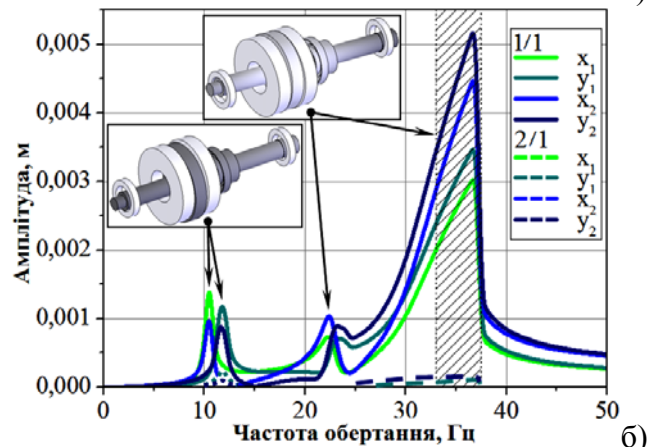


Рисунок 10 – Тривимірний спектр вертикального вібропереміщення (y_2) центру правої опорної ділянки (вид зверху)



а)



б)

Рисунок 11 – Експериментальна АЧХ модифікованого ротора і залежності амплітуд від частоти обертання: а) субгармонік; б) супергармонік

Маса ротора 2,7 кг при довжині $\sim 0,3$ м, а розгін ротора здійснювався зі зміною кутової швидкості обертання в діапазоні від 0 до 3000 об/хв. Результати поглиблених експериментів, представлені у вигляді вібропереміщень центрів опорних ділянок ротора, траєкторій їх руху, спектрограм (рис. 9), тривимірних спектрів (рис. 10) і амплітудно-частотних характеристик (рис. 11), дозволили встановити, що застосування МП в якості опор роторів вносить особливості, характерні нелінійним системам, і тому для адекватного моделювання динаміки роторів в МП необхідно застосування нелінеаризованих математичних аналітичних або числових моделей. Так, виявлено роздвоєння і першого ($\sim 10,5$ і ~ 12 Гц), і другого ($\sim 22,5$ і ~ 33 Гц) резонансів внаслідок неоднаковою жорсткості ПМП в горизонтальному і вертикальному напрямках (анізотропія опор) через різні положення статичної рівноваги ($x_{1ст}=x_{2ст}=0$, $y_{1ст}$ і $y_{2ст}\neq 0$) відносно центрів підшипників, що виникають при дії сили тяжіння; пряма ($< 10,5$ Гц) і зворотна (< 12 Гц) циліндричні прецесії, а також пряма ($< 22,5$ Гц) і зворотна (< 35 Гц) конічні прецесії (на рис. 11 показано форми коливань, які відповідають цим рухам); зрив коливань з переходом з одного стійкого режиму на інший стійкий режим (на рис. 11 заштрихована область). Аналіз результатів дозволив виявити в даній системі, як і в початковій (для якої було отримано такі ж дані), разом з гармонічними коливаннями з частотою збудження (обертання), також суб- і супергармонічні коливання, кратні суб- і суперрезонанси, і встановити зв'язок між радіальними і осьовими коливаннями. Тому отримані результати придатні для перевірки застосовності, адекватності і точності розроблених математичних моделей.

Розробка нових математичних моделей, покликаних внести нову якість в опис тих чи інших явищ, завжди вимагає їх верифікації, тобто розрахункового та експериментального підтвердження їх застосовності і точності, а також ілюстрації їх відмінних рис, які виділяють нові способи математичного опису в порівнянні з існуючими.

У четвертому розділі «Розрахунково-експериментальні дослідження динаміки модельних роторів в магнітних підшипниках» досягнуто основні цілі, сформульовані в роботі, і вирішено реальні задачі з верифікації та підтвердження адекватності, працездатності, точності й практичності запропонованих **у другому розділі** теоретичних і практичних підходів: *до визначення* силових характеристик магнітних підшипників різних типів і фактично будь-якої конструктивної конфігурації на прикладі радіальних пасивних МППКМ і активних осьових МП, застосованих у лабораторній установці; *до пошуку* аналітичних виразів, що описують стан АМП, таких як магнітна енергія та пондеромоторні сили; *до формування і розв'язування* нелінійних СДР, що описують динаміку складних мехатронних систем «ротор в магнітних підшипниках різних типів»; *до моделювання* лінійних і нелінійних явищ роторної динаміки в таких системах. Підтвердження адекватності запропонованого **в другому розділі** загального підходу до моделювання нелінійної динаміки роторів в МП різних типів досягається порівнянням всіх можливих результатів, таких як віброграми контрольних точок, траєкторії їх руху, спектрограми, тривимірні спектри і АЧХ, з експериментальними даними, описаними **в третьому розділі**. Отримані результати порівняльних аналізів доводять точність моделей, методик, способів і розрахункових засобів у визначенні параметрів і характеристик пасивних і активних магнітних підшипників, а також в описі динамічних явищ, які спостерігаються в реальності.

За допомогою варіантних розрахункових досліджень доведено можливість застосування і точність запропонованої методики числового (за допомогою МСЕ) визначення силових характеристик і залежностей квазіпружних коефіцієнтів магнітного підшипника на постійних кільцевих магнітах, розрахункова схема якого представлена на рис. 12а, при відхиленні роторного магніту від положення рівноваги за всіма трьома координатами. Достовірність розрахункової моделі підтверджено порівнянням результатів розрахунків (рис. 12б) з експериментальними даними (рис. 13). Проведення за допомогою цієї методики серії числових експериментів дозволило довести, що магнітні сили, котрі виникають в МППКМ, залежать від трьох координат, які визначають положення рухомого магніту відносно нерухомого.

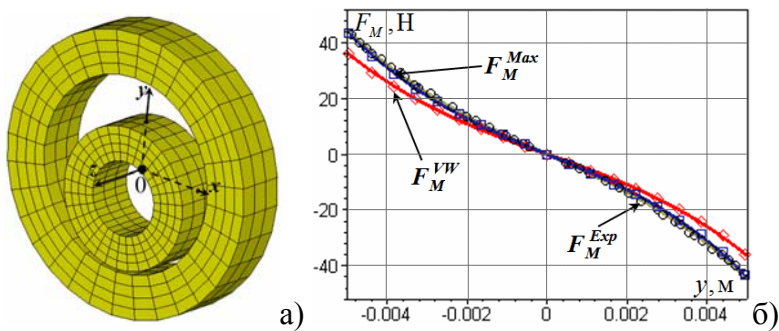


Рисунок 12 – Залежність магнітної сили від радіального зміщення рухомого магніту МППКМ: експериментальні дані (○) і сили, розраховані з використанням методики

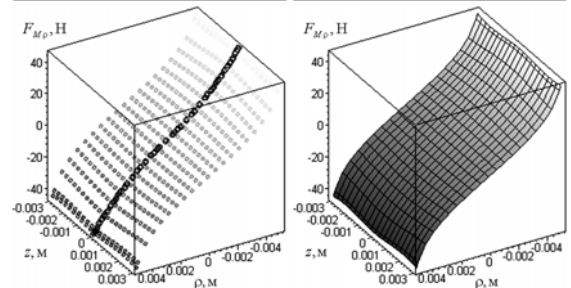
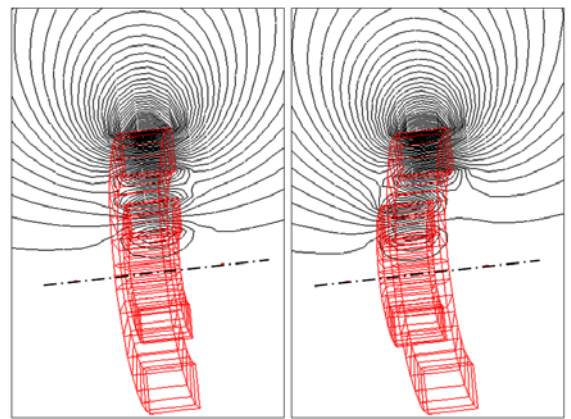


Рисунок 14 – Еквіпотенціальні лінії магнітного поля МППКМ і 3D силові характеристики



Рисунок 13 – Експериментальна установка для визначення силових характеристик МППКМ

Для МППКМ з заданими геометричними і фізичними параметрами, які були використані в лабораторній експериментальній установці «ротор в комбінованому магнітному підвісі», показано, що в межах осьових відхилень, обмежених номінальними зазорами осьового АМП, для радіальних складових магнітної сили можна зі збереженням достатньої точності обмежитися залежністю тільки від двох радіальних координат (рис. 14), але не від однієї з них, як пропонувалося раніше. Крім того, виявлено, що осьова складова магнітної сили в деякому діапазоні є відштовхувальною, а після деякого значення осьового відхилення як в одну, так і в протилежну сторону стає притягальною. Це підтверджує, що в такій конструкції МППКМ, так само як і у всіх інших конструкціях радіальних МППКМ, стійкий підвіс реалізується тільки в радіальному напрямі, а в осьовому такі МППКМ нестійкі.

Визначення демпфуючих властивостей МППКМ і системи виконувалося експериментально, з визначенням декрементів коливань з віброграм вільних коливань.

За допомогою різноманітних прикладів показано, як отримані за допомогою запропонованого аналітичного методу аналізу електромагнітних кіл АМП вирази для

таких характеристик АМП, як магнітні енергія і сили, можуть використовуватися в математичних моделях для числового моделювання поведінки роторів в МП. Крім того, визначувані за допомогою даної методики залежності пондеромоторних сил з урахуванням закону управління можуть служити для вибору параметрів як самих АМП, так і систем і алгоритмів керування, що забезпечують стійкість руху ротора на всіх режимах роботи. Розглянуті приклади формування виразів магнітної енергії, а з її використанням і магнітних сил для осьового АМП лабораторної установки (рис. 15), є верифікацією складових частин (окремих доданків) запропонованої математичної моделі динаміки ротора в МП (7). Отримання виразу магнітної енергії в залежності від узагальнених координат q і потокозчеплень Ψ здійснювалося за допомогою введення еквівалентних схем заміщення (рис. 16) з урахуванням магнітних опорів як повітряних зазорів, так і ділянок магнітопроводів. Підтвердження точності самого способу досягнуто порівнянням з розрахунками, виконаними за допомогою алгоритму скінченноелементного визначення зазначених характеристик і параметрів, а також з експериментальними результатами.

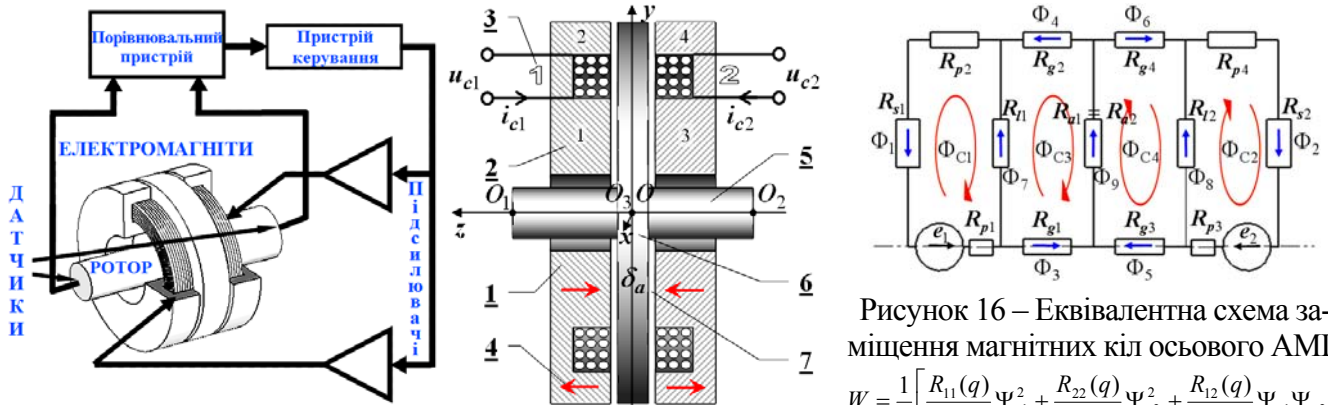


Рисунок 15 – Структурна схема СУ осьового АМП

За допомогою створеної імітаційної обчислювальної моделі ІОМ-ДРМП-Н, в основу якої покладено запропонований спосіб математичного моделювання, проведено розрахункові дослідження для повного магнітного підвісу ротора лабораторної установки, розрахункову схему якого наведено на рис. 17. Показано, як ІОМ-ДРМП-Н може використовуватися для лінійного аналізу для знаходження критичних режимів в першому наближенні за діаграмою Кембелла, яку зображено на рис. 18, та для моделювання нелінійних коливань обертових жорстких роторів в МП та ідентифікації явищ, з візуалізацією і оцінкою значень амплітуд, траєкторій руху (рис. 19, 20), двовимірних і тривимірних спектрів (рис. 20 і 19 відповідно), амплітудно-частотних характеристик та залежностей амплітуд неосновних гармонік від частоти збудження (рис. 21), фазових траєкторій і перерізів Пуанкаре (рис. 20) для аналізу стійкості руху і оптимального вибору практично будь-яких геометричних і фізичних параметрів окремих конструктивних елементів і підвісу в цілому. Її адекватність і можливість застосування для вивчення динаміки жорстких роторів в магнітних підшипниках різних типів підтверджена експериментально. Так, порівняльний аналіз результатів (рис. 11 і 21) дозволив встановити тотожність як за якісним відображенням процесів, що відбуваються в системі, так і за кількісним визначенням їх параметрів – за амплітудами відмінність не перевищує 2%, а за значеннями резонансних частот –

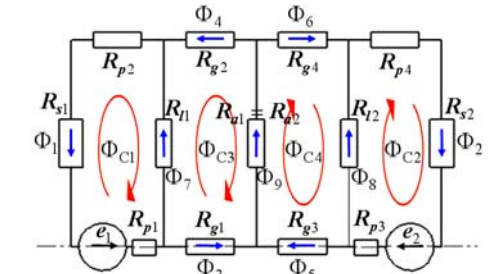


Рисунок 16 – Еквівалентна схема заміщення магнітних кіл осьового АМП

$$W = \frac{1}{2} \left[\frac{R_{11}(q)}{w_1^2} \Psi_{c1}^2 + \frac{R_{22}(q)}{w_2^2} \Psi_{c2}^2 + \frac{R_{12}(q)}{w_1 w_2} \Psi_{c1} \Psi_{c2} \right]$$

0,1%. В результаті використання цієї моделі при проведенні числових експериментів для лабораторної установки, що реалізує комбінований магнітний підвіс ротора визначено, що при дії на ротор гармонічної змушуючої сили в радіальному напрямі і викликаній власною незрівноваженістю ротора, крім гармонічних коливань з частотою збудження, одночасно відбуваються супер- і субгармонічні коливання не тільки в радіальних напрямках, але і в осьовому, а також проявляються інші нелінійні явища роторної динаміки (на рис. 21 позначені I-IX), такі як супер- і субрезонансні коливання, які посилюються внутрішнім резонансом та при яких ротор здійснює рухи типу прямої і зворотної циліндричної або конічної прецесії, а також спостерігається роздвоєння другого і третього резонансів внаслідок анізотропії жорсткості МППКМ, зрив коливань з одного стійкого режиму на інший тощо.

Для обґрунтування твердження про недостатність використання лінійних математичних моделей при вивченні роторної динаміки з достовірним урахуванням магнітних підшипників, розглянуто різні лінеаризовані моделі. З їх використанням доведено, що тільки застосування нелінійних моделей, що реалізують повноту передачі взаємозв'язку різних електромагнітних і механічних процесів, дозволяє достовірно і якісно: досліджувати механізми збудження просторових коливань обертових роторів; визначати умови існування різних резонансних режимів, характерних подібних систем; моделювати супер-, субгармонічні і комбінаційні коливання; здійснювати апробацію алгоритмів управління і вибір оптимальних параметрів МП.

Розроблено новий вид пасивного магнітного підшипника з керованою жорсткістю. Виконані розрахункові різноманітні дослідження дозволили визначити найбільш прийнятний конструктивний варіант для фізичної реалізації в лабораторній установці комбінованого магнітного підвісу ротора (рис. 22). Критерієм такого вибору були доступність технічного виконання і можливість забезпечення варіювання силових і жорсткісних характеристик в заданому діапазоні значень (рис. 23). Працездатність МППКМ з обмоткою управління запропонованої конструкції підтверджена модельними розрахунковими дослідженнями і експериментами на лабораторній установці, що реалізує комбінований пасивно-активний магнітний підвіс ротора. Такі МП з керованою жорсткістю можуть застосовуватися в мало і середньорозмірних роторних машинах, у яких робочі оберти лежать між критичними швидкостями трансляційних і деформаційних форм коливань (тобто руху типу конічної/ циліндричної прецесії і прецесії зігнутої осі). Цей принцип короткочасної зміни характеристик жорсткісних параметрів може бути використаний і для будь-яких інших типів МП на постійних магнітах.

Таким чином, обґрунтовано і практично підтверджено особливість не тільки активних, але і пасивних магнітних підшипників, яка виділяє цей тип пружно-демпферних опор роторів у порівнянні з іншими. Ця відмінна риса полягає в допустимості варіювання механічною жорсткістю МП зміною не механічних, а електричних параметрів – струмів і опорів в колах електромагнітів.

Зазначена особливість МП покладена в основу запропонованого способу зниження амплітуд коливань ротора в магнітних підшипниках різних типів при проходженні резонансних режимів в процесі його розгону до робочих обертів обертання і вибігу. Алгоритм роботи СУ та процес розгону зображено на рис. 24.

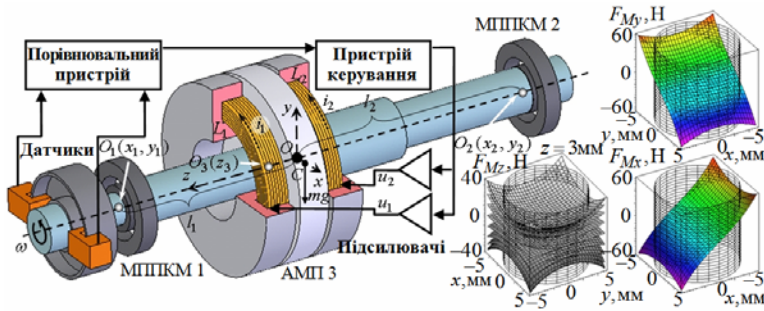


Рисунок 17 – Комбінований магнітний підвіс ротора лабораторної установки з СУ осьового АМП: розрахункова модель і магнітні сили в МППКМ

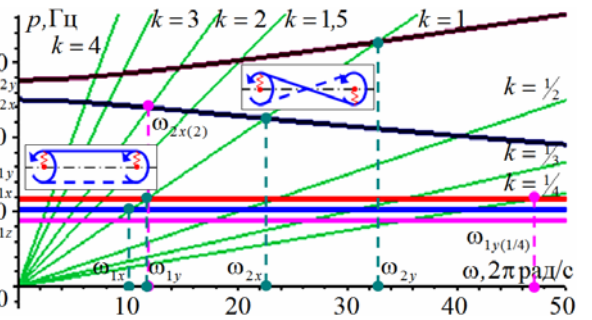


Рисунок 18 – Результати лінійного аналізу динаміки модифікованого ротора: резонансна діаграма Кемпбелла

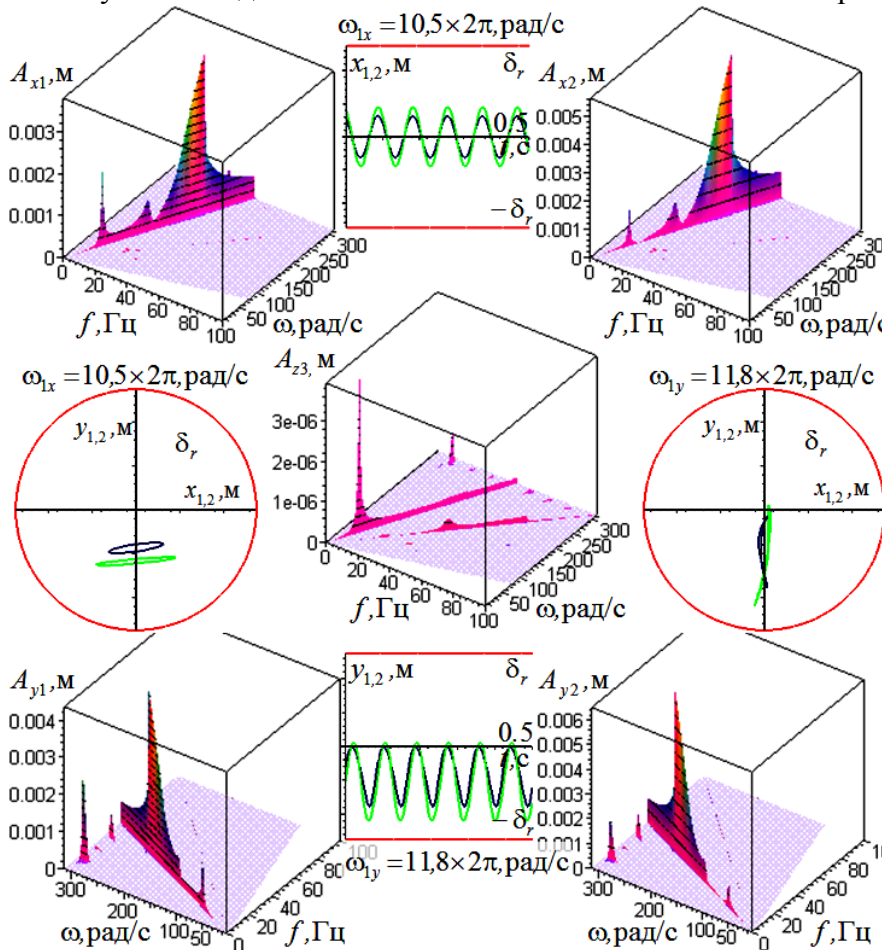


Рисунок 19 – Результати порядкового аналізу віброграм руху ротора в напрямках узагальнених координат при $\omega=0-100\pi$ рад/с

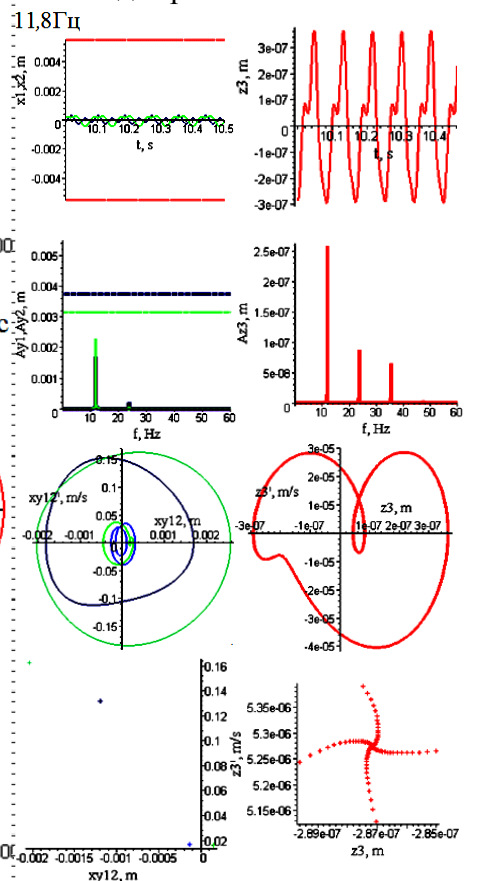


Рисунок 20 – Характеристики динаміки ротора: віброграми, спектри сигналів, фазові траєкторії та перерізи Пуанкаре

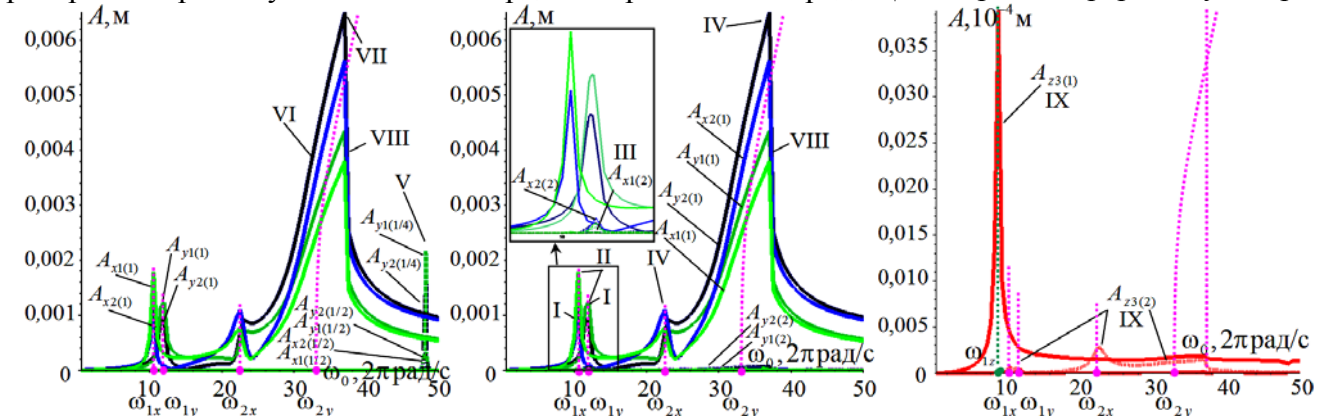


Рисунок 21 – Залежності амплітуд основної, суб- і супергармонік від частоти змушуючої сили

Показано, що рівень максимальних амплітуд при використанні даного способу може бути зменшений на десятки відсотків (рис. 24). Запропонований спосіб є адаптацією відомих підходів із застосуванням тільки АМП, коли в системі управління є датчик обертів, по сигналу з якого при досягненні певних значень кутової швидкості здійснюється перемикання з одного режиму на інший, що забезпечує керовану жорсткість. Розроблений МППКМ зі змінною жорсткістю (рис. 22) робить можливим застосування цього способу відстроювання від резонансів і в системах з ПМП, що підвищує конкурентоспроможність комбінованого магнітного підвісу на ПМП і АМП в порівнянні з магнітним підвісом тільки на АМП. Причому саме якісне математичне моделювання за рахунок застосування розроблених підходів щодо пошуку силових характеристик ПМП і АМП, виразів магнітної енергії АМП, а також опису

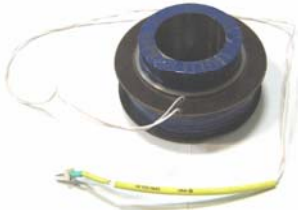


Рисунок 22 – ПМП на кільцевих постійних магнітах з керованою жорсткістю

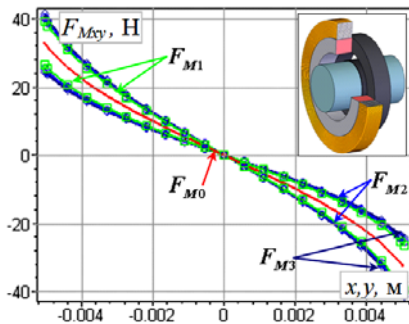


Рисунок 23 – Залежності сил в радіальному МППКМ з обмоткою підмагнічування при різних режимах I, II, III

нелінійної динаміки роторів в МП, дозволяє обґрунтовано обирати параметри для реалізації способу на основі числових, а не натурних експериментів.

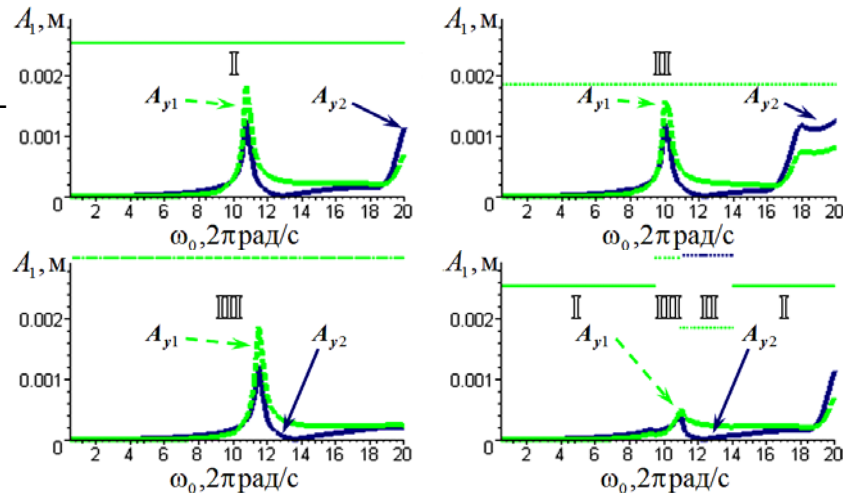


Рисунок 24 – АЧХ (залежності першої гармоніки) при різних режимах роботи системи управління МППКМ з обмоткою підмагнічування (I, II, III, I-III-II-I)

У п'ятому розділі «Динаміка роторів енергетичних турбомашин з магнітними підшипниками» досягнуто кінцеві цілі, сформульовані в роботі, і з використанням розроблених математичних моделей, способів, методик, алгоритмів і розрахункових засобів чисельно вирішено практичні задачі з визначення характеристик і моделювання динаміки реальних роторних систем з магнітними підшипниками, які є роторними машинами енергетичного машинобудування, для їх синтезу та аналізу динамічної поведінки обертових роторів з метою оцінки вібраційного стану і стійкості руху роторів для зниження віброактивності, визначення раціональних і оптимальних параметрів ротора і магнітних підшипників. Так, розглядаються питання використання запропонованих методик і способів для розробки і створення магнітних опор роторів турбомашин енергетичного машинобудування, таких як детандер-компресорний агрегат для виробництва зрідженого природного газу, які забезпечують необхідні жорсткісні характеристики зокрема і необхідні динамічні параметри взагалі у всьому діапазоні від нуля до робочих обертів обертання. Крім того, на основі створених підходів проводиться моделювання явищ роторної динаміки, що відбуваються в різ-

них енергетичних роторних машинах, а саме: детандер-компресорному агрегаті (ДКА) і енергетичній газотурбінній установці (ГТУ).

На прикладі детандер-компресорного агрегату шляхом серії порівняльних аналізів доводиться перевага схеми пасивно-активного магнітного підвісу в порівнянні з традиційними схемами обпирання в масляних підшипниках ковзання.

Запропоновано схему повного магнітного підвісу ротора ДКА (рис. 25), яка дозволяє зробити керованим тільки один ступінь свободи ротора з п'яти. Це досягається за рахунок застосування постійних кільцевих магнітів з осьовою намагніченістю в радіальних МП (рис. 25). Такий підхід здешевлює конструкцію і знижує експлуатаційні витрати. Знайдена також конструкція ротора, яка дає можливість при збереженні динамічних характеристик реалізувати цю схему комбінованого пасивно-активного магнітного підвісу.

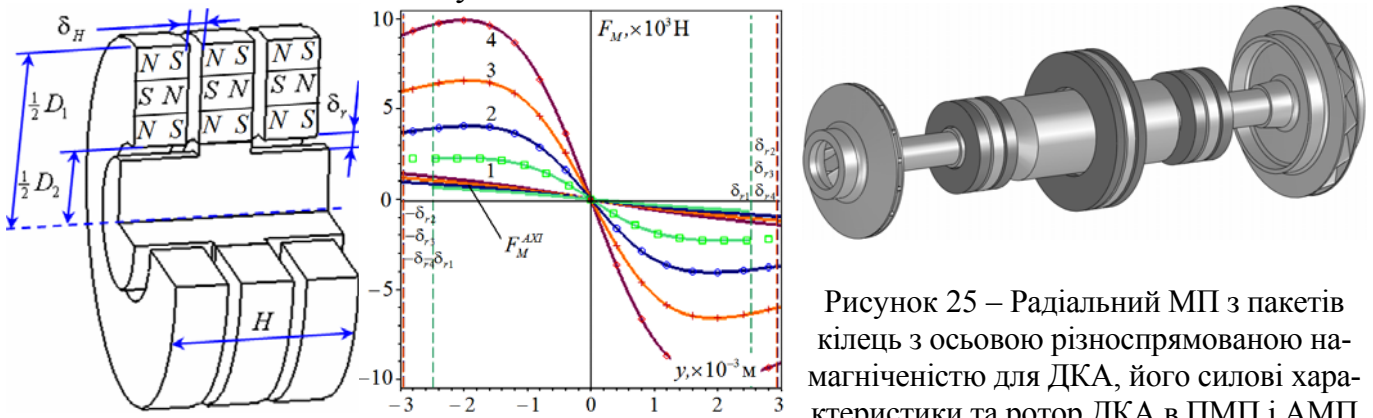


Рисунок 25 – Радіальний МП з пакетів кілець з осьовою різноспрямованою намагніченістю для ДКА, його силові характеристики та ротор ДКА в ПМП і АМП

Для отримання необхідних жорсткісних характеристик радіальних магнітних опор запропоновано і проаналізовано кілька конструктивних варіантів МП, виконаних з кільцевих постійних магнітів з осьовою і радіальною намагніченістю. У підсумку, проведені дослідження дозволили знайти параметри для різних конструкцій МППКМ, які забезпечують можливість підвішування ротора ДКА з жорсткістю, близькою до жорсткості традиційно застосовуваних масляних опор, вписуючись в розміри практично використовуваних підшипників ковзання.

За допомогою варіантних розрахункових досліджень із застосуванням алгоритмів оптимізації для ротора ДКА знайдено конфігурацію МППКМ у вигляді трьох пакетів магнітів (двох статорних і одного роторного) з оптимальними параметрами, що забезпечують необхідну жорсткість і силову характеристику (рис. 25), близьку до лінійної в околі положення статичної рівноваги порівнянному з половиною радіального зазору, що мінімізує виникнення нелінійних (супер- і суб-) резонансів, доказ чого практично виконано за допомогою ІОМ-ДРМП-Н. Дана конструкція перевірена на статичну міцність при дії максимально можливих відцентрових сил. Крім того, проаналізовано і доведено, що навіть ті нелінійні коливання і резонанси, які виникають в системі, є безпечними, а ротор є зарезонансним, але жорстким, що забезпечує реалізацію ефекту самоцентрування на робочих обертах обертання.

Практично підтверджено необхідність нелінійного моделювання фізично зв'язаних електричних, магнітних і механічних процесів і ефектів, що відбуваються в системах і промислових машинах з роторами в МП різних типів, для коректного опису різних лінійних і нелінійних явищ (на рис. 26 позначені I-IX) з метою від-

строювання системи від можливих критичних станів в області частот від нуля до робочих обертів обертання.

Так, знайдена конфігурація МППКМ для ротора ДКА, дозволила виключити більшість негативних явищ нелінійної роторної динаміки, що продемонстровано докладним аналізом з візуалізацією і оцінкою віброграм, траєкторій руху, двовимірних і тривимірних спектрів,

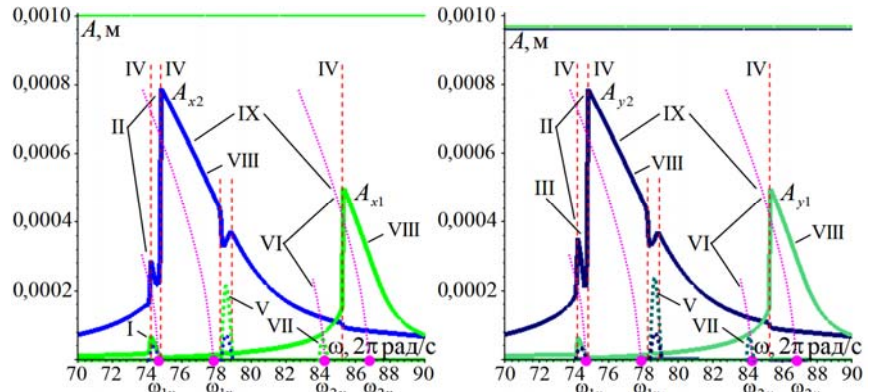


Рисунок 26 – Залежності для опорних ділянок ротора ДКА амплітуд основної, суб- і супергармонік від частоти змушуючої сили амплітудно-частотних характеристик та залежностей амплітуд неосновних гармонік від частоти збудження, а також фазових траєкторій і перерізів Пуанкаре для оцінки стійкості руху. Такий аналіз став можливим завдяки розробленим підходам.

Для газотурбінної установки з АМП проведені розрахункові дослідження дозволили знайти за неповними даними розрахункові скінченноелементні моделі роторів турбокомпресора, генератора і всього валопроводу, придатні для порівняльного аналізу його динамічної поведінки і верифікації ІОМ-ДРМП-Н. Достовірність моделей доведена збігом динамічних характеристик, таких як власні частоти і форми, а також критичні швидкості, з даними, відомими з відкритих джерел. Це також підтвердило придатність визначених параметрів для поглиблених досліджень.

За допомогою ІОМ-ДРМП-Н для турбокомпресора і генератора ГТУ виконано розрахунковий аналіз динамічної поведінки роторів в АМП з реальними силовими і жорсткісними характеристиками, які забезпечуються заданими алгоритмами системи управління для двох режимів її роботи. Дані результати показали, що для обох режимів можливе виникнення резонансних станів при розгоні-зупині, а також при робочих швидкостях обертання. Результати аналізу реальної поведінки роторів з відстроюванням від критичних швидкостей з урахуванням спеціальних алгоритмів автоматичного гашення коливань

підтвердили адекватність моделювання з використанням ІОМ-ДРМП-Н. Зокрема, від отриманих амплітудно-частотних характеристик підтвердив відсутність резонансів в робочому діапазоні, а порівняння амплітуд коливань на робочому режимі показало збіг розрахункових даних з експериментальними даними, відомими з відкритих джерел, з допустимим відхиленням.

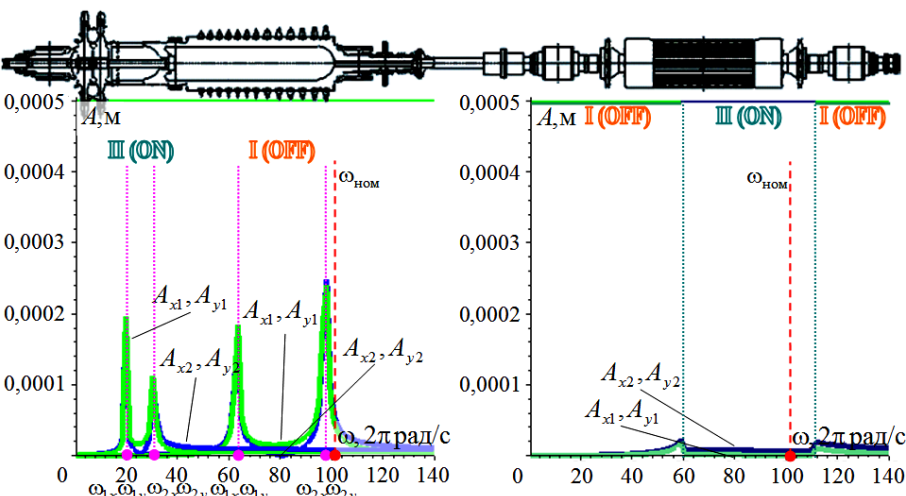


Рисунок 27 – Ротор ГТУ і АЧХ роторів компресора і генератора при жорсткості всіх АМП, відповідних режимам роботи СУ I, II і I-II-I для виходу на номінальний режим роботи ГТУ

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему зі створення **нового загального способу** математичного опису динамічної поведінки роторів в системах з пасивними і активними магнітними підшипниками в різних комбінаціях на основі обґрунтованих теоретичних підходів з розробкою модельних систем диференціальних рівнянь, практичних алгоритмів і обчислювальних інструментів числового аналізу динаміки роторів машин подібного типу. Цей **спосіб відрізняється** узагальненістю підходу і повнотою урахування нелінійних взаємозв'язків електричних, магнітних і механічних процесів, що **дозволяє домогтися** можливості адекватного моделювання та пошуку різних динамічних явищ і режимів роботи з метою знаходження раціональних або оптимальних варіантів конструкцій роторних турбомашин енергетичного машинобудування зі зниженою віброактивністю і підвищеною надійністю без проведення великої кількості дорогих натурних експериментів, доводочних робіт і тестових пусків.

Отримані при вирішенні поставлених задач теоретичні та практичні результати дозволяють прийти до наступних **узагальнюючих висновків**:

1. Проведено аналіз сучасного стану проблеми, що стосується математичного моделювання динамічної поведінки роторів різних механічних систем з пасивними і активними магнітними підшипниками, зокрема турбомашин енергетичного машинобудування, який привів до висновку, про те, що застосовні в переважній більшості лінійні підходи і лінеаризовані моделі, а також моделі з урахуванням лише деяких нелінійних ефектів, мають значну кількість недоліків і упущень.

2. Розроблено загальний спосіб математичного опису та моделювання роторної динаміки для розрахунку і аналізу характеристик коливальних процесів в енергетичних турбомашинах з пасивними і активними магнітними підшипниками в різних комбінаціях, який має низку переваг у порівнянні з існуючими, оскільки враховує повноту нелінійного взаємозв'язку між механічними, магнітними і електричними процесами, що відбуваються в системі, а також дає можливість моделювання більшості практично значущих фізичних, конструктивних і функціональних особливостей.

3. Сформульовано, практично і експериментально підтверджено єдиний методологічний підхід до числового визначення параметрів, їх залежностей і аналітичних виразів величин, що входять в систему нелінійних диференціальних рівнянь математичної моделі, таких як силові і жорсткісні характеристики ПМП і АМП практично будь-якої конфігурації і конструктивного виконання.

4. Запропоновано, практично реалізовано і експериментально верифіковано аналітичний спосіб знаходження уточнених виразів магнітної енергії і сил в АМП з урахуванням законів управління для включення їх в математичні моделі, який дає можливість урахування потоків розсіювання і магнітних опорів ділянок магнітопроводів АМП і забезпечує некритичність математичної моделі до виникнення «нульових» зазорів і струмів.

5. Для реалізації запропонованих аналітичних і числових методик створено, розрахунковим і експериментальним чином верифіковано програмні засоби: у вигляді параметричних кодів для знаходження оптимальних силових характеристик пасивних і активних радіальних і осьових магнітних підшипників, які дозволяють

отримувати аналітичні залежності, адаптовані для використання в математичних моделях динаміки роторів; у вигляді інтегрованого програмного забезпечення для попередньої оцінки динамічних властивостей роторних систем і машин з магнітними підшипниками або пружно-демпферними опорами інших типів; у вигляді імітаційної обчислювальної моделі динаміки роторів для проведення уточненого аналізу роторної динаміки з урахуванням нелінійностей на підставі запропонованого способу формування математичних моделей динаміки роторів в магнітних підвісах, встановлених в пасивних та/або активних магнітних підшипниках.

6. Для підтвердження обґрунтованості, повноти, переваги, достовірності, застосовності, адекватності, істинності і точності запропонованих і реалізованих способів, методик, алгоритмів і розрахункових засобів з їх застосуванням створена фізична реалізація лабораторної установки повного пасивно-активного магнітного підвісу горизонтального ротора, що є прототипом варіанту обпирання ротора детандер-компресорного агрегату установки для скраплення природного газу, в якій в якості двох радіальних опор використано створені застосуванням кільцевих постійних магнітів з осьюою намагніченістю пасивні магнітні підшипники, а в якості осьюою опори – активний магнітний підшипник, в функціоналі якого використані оригінальні спосіб і система управління. Запатентований спосіб дискретного управління активними магнітними підшипниками має новизну і дозволяє виробляти керуючі сигнали, що подаються на силові виконавчі електромагніти, в залежності не тільки від переміщень всіх контрольних точок ротора, а й від швидкостей їх руху, а також миттєвих значень струмів в котушках цих електромагнітів. На основі цього методу дискретного управління реалізовано систему автоматичного управління осьюовим упорним активним магнітним підшипником.

7. З використанням створеного програмно-апаратного вимірювального комплексу виконано серію експериментальних досліджень з вивчення динамічних характеристик лабораторної моделі ротора в магнітних підшипниках пасивного і активного типів, результати яких дозволили модифікувати конструкцію для поліпшення характеристик і зниження амплітуд коливань на резонансних режимах без внесення додаткового демпфування майже на 60%. Крім того, експериментально отримані вібропереміщення центрів опорних ділянок ротора, траєкторії їх руху, спектрограми і амплітудно-частотні характеристики дозволили виявити, що застосування МП в якості опор роторів вносить особливості, характерні нелінійним системам, і тому для адекватного моделювання динаміки роторів в МП необхідне застосування тільки нелінійних математичних моделей.

8. Числовими дослідженнями для ротора лабораторної установки на створеній імітаційній обчислювальній моделі ІОМ-ДРМП-Н порівняльним аналізом експериментальних і розрахункових даних підтверджена адекватність, працездатність, точність і практичність запропонованих теоретичних і практичних підходів: до визначення силових характеристик магнітних підшипників різних типів (пасивних і активних) і фактично будь-якої конструктивної конфігурації; до пошуку аналітичних виразів, що описують стан АМП, таких як магнітна енергія, пондеромоторні сили; до формування і розв'язання систем нелінійних диференціальних рівнянь, що описують динаміку складних мехатронних систем «ротор в пасивних і активних магнітних підшип-

никах»; до моделювання лінійних і нелінійних явищ роторної динаміки в цих системах.

За результатами виконаних числових досліджень динаміки роторів лабораторної установки вихідної і модифікованої конструкції при аналізі діаграм Кембелла, величин амплітуд, траєкторій руху, двовимірних і тривимірних спектрів, амплітудно-частотних характеристик, залежностей амплітуд неосновних гармонік від частоти збудження, фазових траєкторій і перерізів Пуанкаре:

- знайдено пояснення спостережуваних в експериментах деяких явищ, таких як значне перевищення (в 3,5 рази – 7 мм в порівнянні з 2 мм) радіальних амплітуд другого резонансного режиму, при якому ротор здійснює рух типу конічної прецесії, в порівнянні з першим резонансним режимом, при якому прецесія циліндрична, що є наслідком виникнення в осьовому АМП дестабілізуючого моменту через різницю зазорів в окружному напрямі при нахилі ротора;

- визначено, що при дії на ротор гармонічної змушуючої сили в радіальному напрямі від власної незрівноваженості ротора крім гармонічних коливань з частотою збудження одночасно відбуваються супер- і субгармонічні коливання не тільки в радіальних напрямках, але і в осьовому, причому на деяких режимах амплітуди субгармонік можуть перевищувати амплітуди основної гармоніки в кілька разів (для вихідного ротора 2,5 і 0,5 мм відповідно);

- встановлено наявність інших нелінійних явищ роторної динаміки, таких як супер- і субрезонансні коливання, при яких ротор здійснює рухи типу прямої і зворотної циліндричної або конічної прецесії, причому на деяких режимах субрезонансні коливання, посилюючись внутрішнім резонансом, виникають при відносно високих частотах збудження і мають амплітуди, які значно перевершують амплітуди першої гармоніки (для модифікованого ротора 2,2 і 0,7 мм);

- в області частот, в яких можливі два стійких режими вимушених коливань, виявлено зрив коливань зі зміною амплітуд в 2,5-2,8 разів;

- порівняльним аналізом розрахункових і експериментальних результатів встановлено тотожність підходів до математичного моделювання нелінійних процесів як за якісним відображенням процесів, що відбуваються в системі, так і за кількісним визначенням їх параметрів (за амплітудами відмінність <2%, а за значеннями резонансних частот – <0,1%);

- аналізом різних лінеаризованих математичних моделей обґрунтовано твердження про недостатність використання лінійних підходів при вивченні роторної динаміки з достовірним урахуванням магнітних підшипників, тому що лінеаризація нелінійної моделі різними способами призводить до визначення частот резонансних режимів з похибкою до 8%, а їх амплітуд – до 40%.

Таким чином, у результаті серії досліджень продемонстровано і експериментально доведено перевагу розробленого і практично реалізованого способу математичного опису впливливих на віброактивність енергетичних роторних машин лінійних і нелінійних явищ роторної динаміки в системах з магнітними підшипниками різних типів у порівнянні з існуючими підходами і математичними моделями як числовими, так і аналітичними. Застосування такого комплексного підходу до моделювання динаміки роторних систем з магнітними підшипниками сприяє поліпшенню динамічних параметрів цілого класу роторних машин за рахунок більш корект-

ного опису динамічних процесів і явищ, які відбуваються в них, що в свою чергу призводить до зменшення вартості доводочних робіт на етапі конструювання та введення в експлуатацію, а також зниження експлуатаційних витрат і витрат на енерго-ресурси.

9. Розроблено новий вид пасивного магнітного підшипника з керованою жорсткістю, який дозволяє варіювання механічною жорсткістю МП зміною не механічних, а електричних параметрів, що дає можливість відстроювання від резонансів при розгоні і зупині ротора. Працездатність даного МППКМ з обмоткою управління підтверджено модельними розрахунковими дослідженнями і експериментами на лабораторній установці з ротором в ПМП і АМП.

Запропоновано спосіб зниження амплітуд коливань ротора при проходженні резонансних режимів в процесі його розгону до робочих обертів обертання і вибігу в системах з ПМП, що підвищує конкурентоспроможність комбінованого магнітного підвісу на ПМП і АМП в порівнянні з магнітним підвісом тільки на АМП, а також показано, що рівень максимальних амплітуд при використанні даного способу може бути зменшений на 10-80%.

10. З використанням розроблених математичних моделей проведено розрахункові дослідження для роторних машин енергетичного машинобудування з метою їх синтезу та аналізу динамічної поведінки обертових роторів для зниження віброактивності, визначення раціональних або оптимальних параметрів ротора і магнітних підшипників, за результатами яких:

- запропоновано схему повного пасивно-активного магнітного підвісу ротора детандер-компресорного агрегату установки для скраплення природного газу, яка дозволяє зробити керованим тільки один ступінь свободи ротора з п'яти, а також знайдено конструкцію ротора, яка дає можливість при збереженні динамічних характеристик реалізувати цю схему;

- за допомогою варіантних розрахункових досліджень різних конструктивних варіантів із застосуванням алгоритмів оптимізації для ротора ДКА знайдено конфігурацію радіальних пасивних магнітних підшипників, яка мінімізує можливість виникнення нелінійних резонансів;

- практично підтверджено необхідність нелінійного моделювання фізично зв'язаних електричних, магнітних і механічних процесів і ефектів для коректного опису різних лінійних і нелінійних явищ динаміки ротора ДКА в МП з метою відстроювання системи від можливих критичних станів в області частот від нуля до робочих обертів обертання;

- проаналізовано і доведено, що навіть ті нелінійні коливання ротора ДКА в ПМП і АМП та резонанси, які виникають в системі, є безпечними, а ротор є зарезонансним, але жорстким, що забезпечує реалізацію ефекту самоцентрування на робочих обертах обертання;

- встановлено, що ротор ДКА в спроектованому повному пасивно-активному магнітному підвісі в області кутових швидкостей від нуля до робочих обертів здійснює рухи типу конічної або циліндричної, прямої або зворотної прецесії, у вигляді гармонічних, суб- і супергармонічних коливань з амплітудами навіть в резонансних областях в 1,5-2 рази меншими від зазору, а в області робочих частот обертання в

результаті реалізації ефекту самоцентрування меншими в 25 разів;

– аналізом віброграм, траєкторій руху опорних ділянок ротора, спектрограм, фазових траєкторій і перерізів Пуанкаре з оцінкою стійкості руху підтверджено, що створено проект працездатного комбінованого магнітного підвісу для ротора ДКА, який має цілу низку переваг;

– аналізом динаміки роторів турбокомпресора і турбогенератора енергетичної газотурбінної установки на магнітному підвісі з застосуванням тільки АМП, що показав розбіжність між розрахунковими даними і експериментальними результатами, відомими з відкритих джерел, на рівні, що не перевищує 1-2%, підтверджено і верифіковано працездатність, точність і достовірність розробленої методології аналізу динаміки роторів також тільки в АМП (без ПМП).

Таким чином, доведено, що використання запропонованих і реалізованих способів, методик, алгоритмів і розрахункових засобів дозволяє підвищити достовірність розрахункового визначення параметрів роторів, пасивних і активних магнітних підшипників і систем управління АМП, що дає можливість істотного скорочення обсягу експериментальних досліджень та підвищення ефективності проведення науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи.

11. Результати наукових досліджень впроваджено в практику науково-дослідних робіт одного з найбільших в Європі машинобудівних комплексів з випуску устаткування для нафтової, газової, атомної та хімічної промисловості, провідного підприємства машинобудівної галузі України ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання» (3 акти впровадження – 2009, 2009, 2017 р.р.), а також в наукову діяльність і навчальний процес НТУ «ХП» (6 актів впровадження – 2010, 2011, 2011, 2011, 2017, 2017 р.р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мартыненко Г.Ю., Смирнов М.М. Построение связанной многомерной нелинейной модели вращающегося ротора с управляемыми электромагнитными подшипниками. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2002. Т. 8, №9. С. 143-151.

Здобувачем побудовано математичну модель ротора на магнітному підвісі з урахуванням електромагнітної взаємодії елементів магнітного підвісу з ротором, змін керуючих напруг на електромагнітах, а також впливу зміни криволінійного зазору в процесі руху на індуктивність полюсних катушок.

2. Смирнов М.М., Мартыненко Г.Ю., Бабенко И.Н. О необходимости учета некоторых параметров магнитопровода при построении математической модели ротора на управляемых электромагнитных подшипниках. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2003. Т. 3, №8. С. 97-104.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку магнітних кіл АМП за допомогою МСЕ для визначення дискретних параметрів магнітопроводу, виконано оцінку впливу таких факторів, як опір зазору, магнітні втрати в феромагнетику і потоки розсіювання, на точність математичної моделі «ротор в АМП».

3. Смирнов М.М., Мартыненко Г.Ю., Бабенко И.Н. Конечноэлементный расчет магнитных цепей активных магнитных подшипников на основе уравнений магнитостатики. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2003. Т. 1, №12. С. 129-138.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку магнітних кіл АМП за допомогою МСЕ для визначення дискретних параметрів магнітопроводу, виконано оцінку впливу таких факторів, як опір зазору, магнітні втрати в феромагнетикі і потоки розсіювання, на точність математичної моделі «ротор в АМП».

4. Смирнов М.М., Мартыненко Г.Ю. Експериментальні дослідження стійкості системи управління електромагнітного підшипника. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2003. Вип. 55. С. 65-70.

Здобувачем виконано експериментальний підбір параметрів алгоритму цифрової імпульсної системи управління, що забезпечують стійку левітацію ротора масштабної моделі турбокомпресора з АМП, проведено експериментальні дослідження для перевірки математичних моделей.

5. Мартыненко Г.Ю. Расчетные исследования ротора турбокомпрессора газоперекачивающего агрегата на управляемом электромагнитном подвесе. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків, 2004. №1. С. 85-88.

6. Смирнов М.М., Мартыненко Г.Ю. Экспериментальная оценка влияния погрешностей измерения положения на устойчивость движения ротора в управляемых электромагнитных подшипниках. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2004. №20. С. 99-106.

Здобувачем виконано експериментальний підбір параметрів алгоритму цифрової імпульсної системи управління, що забезпечують стійку левітацію ротора масштабної моделі турбокомпресора з АМП, проведено експериментальні дослідження і аналіз впливу конструктивних похибок засобів вимірювань на стійкість руху ротора.

7. Мартыненко Г.Ю. Исследование устойчивости движения ротора в управляемых электромагнитных подшипниках с помощью нелинейной имитационной вычислительной модели. *Проблемы машиностроения*. Харьков, 2005. Т. 8, №1. С. 47-58.

8. Мартыненко Г.Ю. Уточнение математической модели ротора на ЭМП за счет определения магнитной проводимости зазоров под полюсами с учетом взаимовлияния смещений в радиальном и осевом направлениях. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2006. №32. С. 179-192.

9. Мартыненко Г.Ю. Построение математической модели полного электромагнитного подвеса ротора с использованием взаимосвязанных магнитомеханических уравнений Рауса. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2007. №22. С. 107-126.

10. Мартыненко Г.Ю. Определение жесткостных характеристик радиальных магнитных подшипников на двух кольцевых постоянных магнитах. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат.

вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2007. №38. С. 83-95.

11. Ульянов Ю.М., Смирнов М.М., Мартиненко Г.Ю. Система управління осьовим рухом ротора на комбінованому магнітному підвісі з пасивними радіальними і активним осьовим підшипниками. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2008. Вип. 97. С. 107-118.

Здобувачем виконано розрахункові дослідження, за результатами яких створена експериментальна установка комбінованого електромагнітного підвісу ротора з керованим осьовим ступенем свободи, для системи автоматичного регулювання якої запропоновано схему і алгоритм управління, що забезпечують стійкість руху ротора.

12. Мартыненко Г.Ю. Магнитный подшипник на постоянных кольцевых магнитах с изменяемой жесткостью. *Проблемы машиностроения*. Харків, 2008. Т. 11, №2. С. 46-55.

13. Мартыненко Г.Ю. Математическая модель динамического поведения жесткого ротора турбокомпрессора в активных магнитных подшипниках. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Технології машинобудування. Харків, 2008. №34. С. 67-77.

14. Мартыненко Г.Ю. Определение силовых и жесткостных характеристик осевого активного магнитного подшипника при заданном законе управления. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2008. №36. С. 133-141.

15. Мартыненко Г.Ю., Жовдак В.А., Смирнов М.М., Ульянов Ю.Н. Динамика роторов турбокомпрессоров на активных магнитных подшипниках при дискретном управлении. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Nauki Techniczne: Budowa i Eksploatacja Maszyn*. Kielce, 2008. 10. Vol. 1. Pp. 109-116.

Здобувачем проведено розрахункові та експериментальні дослідження по визначенню раціональних параметрів магнітного підвісу для діючої моделі турбокомпресора та на основі розроблених чисельних підходів виконано дослідження динамічної стійкості модельного ротора турбокомпресора з АМП при використанні розроблених алгоритмів управління для дискретної цифрової системи регулювання, яке підтверджує їх ефективність.

16. Мартыненко Г.Ю. Магнитные подшипники как упруго-демпферные опоры роторов с управляемой жесткостью. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2008. №47. С. 111-124.

17. Мартиненко Г. Критичні швидкості обертання ротора експериментальної моделі в пасивних радіальних і активному осьовому підшипниках. *Машинознавство*. Львів, 2009. №3(141). С. 28-33.

18. Мартыненко Г.Ю. Особенности адекватного математического моделирования динамического поведения роторов в активных магнитных подшипниках газотранспортных и газотурбинных установок. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Современные технологии в газотурбостроении. Харьков, 2009. №4/4(40). Ч. 1. С. 34-39.

19. Мартыненко Г.Ю. Математическое описание динамического поведения ротора в магнитных подшипниках в зависимости от принятых упрощений. Часть 1.

Жесткий ротор. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2009. №30. С. 95-119.

20. Мартиненко Г. Ідентифікація математичної моделі жорсткого ротора в пасивно-активному магнітному підвісі на підставі експериментальних даних. *Машинознавство*. Львів, 2009. №11(149). С. 9-14.

21. Мартыненко Г.Ю. Определение зависимостей радиальных и осевых сил от смещений роторного магнита в радиальном магнитном подшипнике на двух кольцевых постоянных магнитах. *Проблемы машиностроения*. Харьков, 2010. Т. 13, №1. С. 52-64.

22. Мартыненко Г.Ю. Способ аналитического определения магнитных сил в активных магнитных подшипниках роторных машин. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Современные технологии в газотурбостроении. Харьков, 2010. №3/3(45). Ч. 2. С. 67-73.

23. Мартыненко Г.Ю., Салюк Г.А. Создание интегрированного программного средства для численного определения силовых характеристик радиальных активных магнитных подшипников с учетом закона управления. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2010. №69. С. 91-100.

Здобувачем розроблено методику скінченноелементного розрахунку силових характеристик радіального АМП з восьмиполюсним статором з заданим законом керування, виконано аналіз результатів розрахункових досліджень.

24. Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Гадяка В.Г., Мартыненко Г.Ю. Особенности проектирования ротора с опорами на постоянных магнитах для детандер-компрессорного агрегата. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Современные технологии в газотурбостроении. Харьков, 2011. №3/10(51). С. 31-36.

Здобувачем виконано оптимальний пошук жорсткісних характеристик пасивних магнітних підшипників та запропонована конструкція ротора ДКА, яка дає можливість при збереженні динамічних характеристик реалізувати схему комбінованого пасивно-активного магнітного підвісу.

25. Мартыненко Г.Ю. Оптимальное проектирование радиальных пассивных магнитных подшипников для ротора детандер-компрессорного агрегата. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. Харків, 2011. №63. С. 79-100.

26. Мартыненко Г.Ю. Общий подход к моделированию нелинейной динамики жестких роторов в магнитных подшипниках различных типов. *Доповіді Національної академії наук України*. Київ, 2012. №3. С. 78-84.

27. Мартыненко Г.Ю., Ульянов Ю.Н., Пригорнев А.Н. Программно-аппаратный комплекс для анализа виброперемещений роторов на магнитных подшипниках. *Системы обработки информации*. Харків, 2012. Вип. 7(105). С. 109-116.

Здобувачем проведено аналіз результатів експериментальних досліджень на лабораторній установці «ротор в МП», виконаних за допомогою програмно-апаратного комплексу, оцінено сумарну похибку і довірчі інтервали вимірювань.

28. Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Гадяка В.Г., Мартыненко Г.Ю. Особенности

модифіцирования ротора детандер-компрессорного агрегата для применения опор на постоянных магнитах. *Компрессорная техника и пневматика*. Москва, 2012. №4. С. 22-28.

Здобувачем виконано варіантні числові експерименти по визначенню жорсткості пасивних магнітних підшипників та запропонована конструкція ротора ДКА, яка дає можливість при збереженні динамічних характеристик реалізувати схему комбінованого пасивно-активного магнітного підвісу.

29. Мартыненко Г.Ю., Левашов В.А., Бухолдин Ю.С. Оценка возможности применения опор на постоянных магнитах для ротора детандер-компрессорного агрегата. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. Сумы, 2012. №4(30). С. 39-45.

Здобувачем розроблено алгоритм і розрахунковий засіб та виконано оптимальний пошук параметрів для різних конструкцій радіальних магнітних підшипників на постійних кільцевих магнітах, що забезпечують необхідні силові та жорсткісні характеристики, проведено розрахунки критичних швидкостей та вироблено практичні рекомендації по модифікації конструкції ротора і ПМП для поліпшення динамічних параметрів агрегату.

30. Мартыненко Г.Ю., Мякинников С.С. Интегрированное программное средство для численного анализа динамики роторов на различных опорах. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2012. №55(961). С. 117-131.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, розроблено методики розрахунків та алгоритми інтегрованого програмного засобу для числового пошуку власних частот і форм, критичних швидкостей роторів, гармонійного відгуку, а також виконано верифікацію розрахункових моделей і програмних засобів за допомогою порівняльного аналізу з даними власних експериментів.

31. Мартыненко Г.Ю. Методика экспериментальных исследований динамики модельного ротора в комбинированном магнитном подвесе. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2013. №58(1031). С. 125-135.

32. Мартыненко Г. Особенности анализа динамики ротора детандер-компрессорного агрегата в магнитных подшипниках за допомогою різних дискретних моделей. *Машинознавство*. Львів, 2013. №9-10(195-196). С. 3-7.

33. Мартыненко Г.Ю. Результаты экспериментальных исследований и анализ динамики модельного ротора в магнитных подшипниках разных типов. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2013. №63(1036). С. 90-101.

34. Мартыненко Г.Ю. Применимость нелинейных аналитических моделей для описания динамики роторов в магнитных подшипниках. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2014. №1(73). С. 77-87.

35. Мартыненко Г.Ю. Нелинейные явления роторной динамики в системах с магнитными подшипниками. *Механіка та машинобудування*. Харків, 2014. №1. С. 36-50.

36. Мартыненко Г.Ю., Олейник А.В. Идентификация расчетной модели ротора газотурбинной установки в магнитных подшипниках по геометрическим и динамическим параметрам. *Вісник Національного технічного університету «Харківський*

політехнічний інститут». Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2014. №57(1099). С. 56-67.

Здобувачем запропоновано методику та розроблено спеціальні алгоритми пошуку за неповними даними розрахункової скінченноелементної моделі ротора газотурбінної установки в магнітних підшипниках, яка призначена для поглибленого аналізу його динамічної поведінки, виконано інтелектуальний багатофакторний аналіз серії варіантних статичних і динамічних розрахунків з метою визначення параметрів адекватної розрахункової моделі.

37. Мартыненко Г.Ю. История, актуальные проблемы, методы и средства анализа явлений роторной динамики с учетом традиционных и магнитных подшипников. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2014. №58(1100). С. 77-131.

38. Мартыненко Г.Ю. Аналіз динаміки ротора детандер-компресорного агрегату с магнітними підшипниками за допомогою різних скінчено-елементних моделей. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2015. №4(80). С. 32-38.

39. Мартыненко Г.Ю., Марусенко О.М. Особенности автоматизации параметричного моделирования динамики роторов відцентрових компресорів за допомогою різних моделей. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2015. №57(1166). С. 74-80.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, розроблено методологію побудови скінченноелементних моделей різних типів, виконано порівняльний аналіз результатів розрахунків, надано рекомендації.

40. Martynenko G. The Interrelated Modelling Method of the Nonlinear Dynamics of Rigid Rotors in Passive and Active Magnetic Bearings. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. Прикладная физика. Харьков, 2016. №2/5(80). С. 4-13.

41. Martynenko G. Application of Nonlinear Models for a Well-Defined Description of the Dynamics of Rotors in Magnetic Bearings. *Eureka: Physics and Engineering*. Tallinn, 2016. Number 3. Pp. 3-12.

42. Martynenko G. Resonance Mode Detuning in Rotor Systems Employing Active and Passive Magnetic Bearings with Controlled Stiffness. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. Kuantan, 2016. Vol. 13, Issue 2. Pp. 3293-3308.

43. Мартыненко Г.Ю., Марусенко А.М. Способы учета и моделирования сил сопротивления различной физической природы в механических динамических, колебательных и роторных системах. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2016. №46(1218). С. 52-59.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, узагальнено і класифіковано щодо практичного застосування підходи до моделювання сил опору в різних конструктивних елементах і опорних вузлах різних роторних машин і систем.

44. Мартыненко Г.Ю., Марусенко О.М. Возможности стандартных программных засобів з урахування жорсткісних властивостей опор при розрахунках динаміки роторів турбомашин. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2017. №4(87). С. 13-19.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, визначено способи скінченно-елементного моделювання і аналізу динаміки роторів турбомашин на пружних опо-

рах за допомогою програмних комплексів, проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з метою визначення найбільш адекватних моделей.

45. Мартиненко Г.Ю., Марусенко О.М. Особливості моделювання роторної динаміки за допомогою методу скінченних елементів з урахуванням взаємної дії демпфуючих властивостей конструктивних елементів турбомашин. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Динаміка і міцність машин. Харків, 2017. №40(1262). С. 43-48.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, визначено способи скінченно-елементного аналізу динаміки роторів турбомашин з коректним урахуванням пружно-демпферних опор та інших елементів, виконано аналіз результатів.

46. Мартиненко Г.Ю., Смірнов М.М. Побудова зв'язаної багатомірної нелінійної моделі обертового ротора з керованими електромагнітними підшипниками. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: анот. доп. X міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 16-17 трав. 2002 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2002. С. 57-58.

Здобувачем побудовано математичну модель ротора на магнітному підвісі з урахуванням електромагнітної взаємодії елементів магнітного підвісу з ротором, змін керуючих напруг на електромагнітах, а також впливу зміни криволінійного зазору в процесі руху на індуктивність полюсних катушок.

47. Смірнов М.М., Мартиненко Г.Ю., Бабенко І.М. Про необхідність урахування деяких параметрів магнітопроводу при побудові математичної моделі ротора на керованих електромагнітних підшипниках. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: анот. доп. XI міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 15-16 трав. 2003 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2003. С. 124.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку магнітних кіл АМП за допомогою МСЕ для визначення дискретних параметрів магнітопроводу, виконано оцінку впливу таких факторів, як опір зазору, магнітні втрати в феромагнетику і потоки розсіювання, на точність математичної моделі «ротор в АМП».

48. Смірнов М.М., Мартиненко Г.Ю. Експериментальне визначення параметрів алгоритму системи управління, що забезпечують стійку левітацію ротора в електромагнітних підшипниках. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: анот. доп. XII міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 20-21 трав. 2004 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2004. С. 85.

Здобувачем виконано експериментальний підбір параметрів алгоритму цифрової імпульсної системи управління, що забезпечують стійку левітацію ротора масштабної моделі турбокомпресора з АМП, проведено експериментальні дослідження для перевірки математичних моделей.

49. Роговой Е.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Мартыненко Г.Ю., Смирнов М.М. Method of Discrete Magnetic Bearing Control for Revolved Rotors. *II междунар. салон изобрет. и новых технологий «Новое время»*: сб. представленных изобрет. и разработ., кл. представленных изобрет.: Общая и инженерная механика, г. Севастополь, 27-29 сент. 2006 г. Севастополь: УКЦ, 2006. С. 23.

Здобувачем виконано математичне обґрунтування запропонованого способу дискретного управління електромагнітним підвісом обертових роторів.

50. Роговой Е.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Мартыненко Г.Ю., Смир-

нов М.М. Способ дискретного управления электромагнитным подвесом вращающихся роторов. *III междунар. салон изобрет. и новых технологий «Новое время»*: сб. представленных изобрет. и разработ., кл. представленных изобрет.: Общая и инженерная механика, г. Севастополь, 26-28 сент. 2007. Севастополь: УКЦ, 2007. С. 49.

Здобувачем виконано математичне обґрунтування запропонованого способу дискретного управління електромагнітним підвісом обертових роторів.

51. Мартиненко Г.Ю. Визначення жорсткостних параметрів магнітних підшипників на постійних магнітах. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф. у 2 ч., м. Харків, 4-6 черв. 2008 р. –Харків: НТУ «ХПІ», 2008. Ч. 1. С. 62.

52. Martynenko G. Modelling the Dynamics of a Rigid Rotor in Active Magnetic Bearings. *6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2008)*: Proceedings, Saint Petersburg, Russia, June 30-July 4, 2008. St. Petersburg: Control of Complex Systems Laboratory, Institute for Problems of Mechanical Engineering, 2008. 6 pp. 1 електрон. опт. диск (CD-R). URL: <http://lib.physcon.ru/file?id=1c85097b6741> (дата звернення: 07.02.2012).

53. Martynenko G. Modelling the Dynamics of a Rigid Rotor in Active Magnetic Bearings. *6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2008)*: Final program and abstract, Saint Petersburg, Russia, June 30-July 4, 2008. St. Petersburg: Institute for Problems of Mechanical Engineering, 2008. P. 137.

54. Мартиненко Г. Визначення критичних швидкостей обертання ротора експериментальної моделі на комбінованому магнітному підвісі. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій*: пр. 1-ої міжнар. наук.-техн. конф., м. Львів, 22-24 жовт. 2008 р. Львів: Кінпатрі Лтд., 2008. С. 119-121.

55. Мисюра С.Ю., Мартыненко Г.Ю. Расчет критических скоростей ротора на магнитном подвесе с помощью программного пакета инженерного конечно-элементного анализа. *III університет. наук.-практ. студ. конф. магістрантів Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»*: тези доп. у 4-х ч., м. Харків, 14-16 квіт. 2009 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2009. Ч. 1. С. 140-142.

Здобувачем запропоновано принципи побудови розрахункової моделі ротора на магнітному підвісі для визначення критичних швидкостей.

56. Мартиненко Г.Ю. Комп'ютерне моделювання динамічної поведінки ротора в комбінованому магнітному підвісі на основі нелінійних рівнянь руху. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: матеріали XVII міжнар. наук.-практ. конф. у 2 ч., м. Харків, 20-22 трав. 2009 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2009. Ч. 1. С. 72.

57. Смірнов М.М., Ульянов Ю.М., Мартиненко Г.Ю. Розробка методу вимірювання осьового положення ротора на керованих магнітних підшипниках за допомогою датчиків сили. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: матеріали XVII міжнар. наук.-практ. конф. у 2 ч., м. Харків, 20-22 трав. 2009 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2009. Ч. 1. С. 80.

Здобувачем виконано розрахункові дослідження, за результатами яких перевірена можливість використання системи вимірювання сил для визначення осьового

положення ротора в системі автоматичного регулювання магнітними підшипниками експериментальної установки.

58. Мартиненко Г. Вибір способу математичного опису динаміки ротора в комбінованому магнітному підвісі на підставі експериментальних досліджень. *Дев'ятий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові*: пр., м. Львів, 20-22 трав. 2009 р. Львів: Кінпатрі Лтд., 2009. С. 52-53.

59. Мартыненко Г.Ю. Особенности адекватного математического моделирования динамического поведения роторов в активных магнитных подшипниках газотранспортных и газотурбинных установок. *Современные технологии в газотурбостроении*: доклады I междунар. науч.-техн. конф., г. Алушта, 7-12 сент. 2009 г. Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2009. 10 с. 1 електрон. опт. диск (CD-R).

60. Мартыненко Г.Ю. Снижение виброактивности роторов турбомашин различного назначения за счет применения магнитных подшипников. *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования*: доклады XIII междунар. науч.-техн. конф., г. Харьков, 21-25 сент. 2009 г. Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2009. 7 с. 1 електрон. опт. диск (CD-R).

61. Мартыненко Г.Ю. Повышение безопасности эксплуатации роторных машин нефтегазовой промышленности с магнитными подшипниками за счет их корректного моделирования. *Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій*: матеріали VIII міжвуз. наук.-практ. конф., м. Харків, 11 груд. 2009 р. Харків: Ун-т цив. захисту, 2009. С. 33-34.

62. Пригорнев А.Н., Мартыненко Г.Ю. Система измерения колебаний ротора на магнитном подвесе. *IV університет. наук.-практ. студ. конф. магістрантів Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»*: тези доп. у 4-х ч., м. Харків, 23-25 берез. 2010 р. Харків: НТУ «ХП», 2010. Ч. 1. С. 132-133.

Здобувачем обґрунтовано необхідність розробки спеціалізованої комп'ютерної системи для вимірювання і аналізу динамічних характеристик роторів з системами магнітного підвісу.

63. Мартиненко Г.Ю., Ульянов Ю.М., Пригорнев О.М. Особливості вимірювань вібропереміщень роторів в активних і пасивних магнітних підшипниках за допомогою комп'ютерної системи збирання й обробки даних. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: матеріали XVIII міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 12-14 трав. 2010 р. Харків: НТУ «ХП», 2010. Ч. 1. С. 72.

Здобувачем запропоновано спеціальні підходи до збору і обробки даних при вимірюванні основних характеристик сигналів вібропереміщень точок ротора в магнітних підшипниках та до виконання аналізу для побудови амплітудно-частотних характеристик, спектрограм і траєкторій руху.

64. Мартыненко Г.Ю. Способ аналитического определения магнитных сил в активных магнитных подшипниках роторных машин. *Современные технологии в газотурбостроении*: доклады II междунар. науч.-техн. конф., г. Алушта, 27 июня-02 июля 2010 г. Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2010. 15 с. 1 електрон. опт. диск (CD-R).

65. Martynenko G. Method of Detuning from Resonance Modes for Rotors in Active Magnetic Bearings with Nonlinear Force Characteristics. *Нелинейная динамика*: тез. докл. 3-ей Междунар. конф., г. Харьков, 21-24 сент. 2010 г. Харьков: ЭДЭНА, 2010. С. 135-140.

66. Мартиненко Г.Ю. Математична модель динаміки жорсткого ротора на комбінованому магнітному підвісі з урахуванням електромагнітомеханічної взаємодії. *Міцність матеріалів та елементів конструкцій*: тези допов. міжнар. наук.-техн. конф. в 2 т., м. Київ, 28-30 верес. 2010 р. Київ: Ін-т пробл. міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2010. Т. 1. С. 240-241.

67. Мартыненко Г.Ю. Нелинейная динамика жестких роторов турбомашин в магнитных подшипниках с учетом взаимосвязи механических и электромагнитных процессов. *Прочность материалов и элементов конструкций*: тр. междунар. науч.-техн. конф., г. Киев, 28-30 сент. 2010 г. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 50-58.

68. Мартыненко Г.Ю. Анализ динамики ротора прототипа турбодетандера с магнитными и электромагнитными подшипниками. *Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні*: тези допов. 4-ої міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 31 трав.-02 черв. 2011 р. Київ: Ін-т пробл. міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2011. С. 145-146.

69. Мартиненко Г.Ю., Брунер М.В. Интегрированный программный засіб скінченно-елементного моделювання динаміки ротора турбодетандера на пружних опорах. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. ХІХ міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 01-03 черв. 2011 р. Харків: НТУ «ХП», 2011. Ч. 1. С. 58.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, розроблено методику проведення розрахунків та алгоритми для інтегрованого програмного засобу.

70. Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Гадяка В.Г., Мартыненко Г.Ю. Особенности проектирования ротора детандер-компрессорного агрегата с опорами на постоянных магнитах. *Современные технологии в газотурбостроении*: доклады III междунар. науч.-техн. конф., г. Алушта, 26 июня-01 июля 2011 г. Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2011. 11 с. 1 электрон. опт. диск (CD-R).

Здобувачем виконано оптимальний пошук жорсткісних характеристик пасивних магнітних підшипників та запропонована конструкція ротора ДКА, яка дає можливість при збереженні динамічних характеристик реалізувати схему комбінованого пасивно-активного магнітного підвісу.

71. Мартиненко Г.Ю., Байкін М.І. Уточнення спектру власних частот і критичних швидкостей обертання ротора ДКА за рахунок використання 3D-моделей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. ХХ міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 15-17 трав. 2012 р. Харків: НТУ «ХП», 2012. Ч. 1. С. 67.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, запропоновано принципи побудови скінченноелементних 3D-моделей ротора ДКА з пружними опорами.

72. Мартыненко Г.Ю. Особенности определения собственных частот, форм и критических скоростей вращения ротора ДКА при использовании различных моде-

лей. *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования*: доклады XIV междунар. науч.-техн. конф., г. Харьков, 24-28 сент. 2012 г. Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2012. 6 с. 1 електрон. опт. диск (CD-R).

73. Мартиненко Г. Моделювання динаміки ротора детандер-компресорного агрегату в магнітних підшипниках на підставі застосування різних моделей. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій*: тези доп. 3-ої міжнар. наук.-техн. конф., м. Львів, 7-9 листоп. 2012 р. Львів: Кінпатрі Лтд., 2012. С. 123-124.

74. Мартыненко Г.Ю. Анализ динамики ротора детандер-компрессорного агрегата с магнитными и электромагнитным подшипниками. *Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні*: тези допов. 5-ої міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 27-30 трав. 2014 р. Київ: Ін-т пробл. міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2014. С. 157-158.

75. Мартиненко Г.Ю., Жолос О.В. Аналіз динаміки ротора детандер-компресорного агрегату з магнітними підшипниками за допомогою різних скінчено-елементних моделей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 15-17 жовт. 2014 р. Харків: НТУ «ХП», 2014. Ч. 1. С. 62.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, запропоновано принципи побудови об'ємних і балково-масових СЕ-моделей ротора ДКА з коректним врахуванням магнітних підшипників, проаналізовано отримані результати.

76. Мартиненко Г.Ю. Адекватність математичного моделювання динаміки роторів в магнітних підшипниках з використанням різних аналітичних моделей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 15-17 жовт. 2014 р. Харків: НТУ «ХП», 2014. Ч. 1. С. 63.

77. Марусенко О.М., Мартиненко Г.Ю. Визначення критичних швидкостей модельного ротора в пружних опорах за допомогою комп'ютерної системи інженерного аналізу. *IX міжнар. наук.-практ. студент. конф. магістрантів НТУ «ХП»*: матеріали у 4-х ч., м. Харків, 07-09 квіт. 2015 р. Харків: НТУ «ХП», 2015. Ч. 1. С. 101-102.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, запропоновано методіку побудови розрахункової моделі ротора лабораторної установки.

78. Марусенко О.М., Мартиненко Г.Ю. Визначення критичних швидкостей модельного ротора в пружних опорах за допомогою комп'ютерної системи інженерного аналізу. *Сучасні технології у промисловому виробництві*: матеріали наук.-техн. конф. викл., співроб., асп. і студент. ф-ту техн. систем та енергоефективних технологій у 2-х ч., м. Суми, 14-17 квіт. 2015 р. Суми: Сумський державний університет, 2015. Ч. 1. С. 148-149.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, запропоновано методіку побудови розрахункової моделі ротора лабораторної установки.

79. Мартиненко Г.Ю. Експериментальне визначення явищ роторної динаміки в системах з магнітними підшипниками. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч.,

м. Харків, 20-22 трав. 2015 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. Ч. 1. С. 56.

80. Мартиненко Г. Експериментальний і розрахунковий аналізи нелінійних явищ динаміки роторів у магнітних підшипниках різних типів. *Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові*: тези доп., м. Львів, 28-29 трав. 2015 р. Львів: Кінпатрі Лтд., 2015. С. 20-21.

81. Мартиненко Г.Ю. Моделювання динамічної поведінки ротора детандер-компресорного агрегату з магнітними підшипниками за допомогою різних дискретних моделей. *Вібрації в техніці та технологіях*: тези доп. XIV Міжнародної наук.-техн. конф., м. Дніпропетровськ, 21-25 верес. 2015 р. Дніпропетровськ: НГУ, 2015. С. 18.

82. Мартиненко Г.Ю., Марусенко О.М. Програмний засіб для моделювання та аналізу динаміки роторів відцентрових компресорів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 18-20 трав. 2016 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Ч. 1. С. 66.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, запропоновано методу розрахунків та алгоритми інтегрованого програмного засобу для аналізу динамічних характеристик роторів компресорів з пружними опорами.

83. Мартиненко Г.Ю. Оцінка динамічної поведінки жорстких роторів у магнітних підшипниках з урахуванням нелінійних ефектів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 18-20 трав. 2016 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Ч. 1. С. 67.

84. Martynenko G.Yu. Nonlinear Vibrations of Rotors in Systems with Magnetic Bearings. *Nonlinear Dynamics: Proceedings of 5th International Conference*, Kharkiv, September 27-30, 2016. Kharkov: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2016. Pp. 157-164.

85. Мартиненко Г.Ю., Марусенко О.М. Демпферні елементи в роторних системах. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXV міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 17-19 трав. 2017 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. Ч. 1. С. 73.

Здобувачем класифіковано різні демпферні елементи, що застосовуються в роторних машинах, запропоновано способи їх врахування в розрахункових моделях.

86. Мартиненко Г.Ю. Особливості чисельного визначення динамічних характеристик ротора газотурбінної установки в магнітних підшипниках. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXV міжнар. наук.-практ. конф. у 4 ч., м. Харків, 17-19 трав. 2017 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. Ч. 1. С. 74.

87. Мартиненко Г.Ю., Марусенко О.М. Особливості розрахунків роторної динаміки за допомогою стандартних програмних засобів. *Вібрації в техніці та технологіях*: зб. тез доп. XVI Міжнародної наук.-техн. конф., м. Вінниця, 26-27 жовт. 2017 р. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 150-152.

Здобувачем сформульовано постановку задачі, визначено способи моделювання роторів на різних опорах за допомогою скінченноелементних програмних комплексів для аналізу динаміки, проведено їх порівняльний аналіз.

88. Мартиненко Г.Ю. Верифікація імітаційної моделі для дослідження динаміки роторів газотурбінної установки в активних магнітних підшипниках. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. XXVI міжнар.

наук.-практ. конф. MicroCAD-2018 у 4 ч., м. Харків, 16-18 трав. 2018 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. Ч. 1. С. 59.

89. Способ дискретного управления электромагнитным подвесом вращающихся роторов / Роговой Е.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.А., Мартыненко Г.Ю., Смирнов М.М.: пат. на изобрет. 2277190 Российская Федерация: МПК F16C 32/04. №2003121317/11; заявл. 10.07.03; опубл. 27.05.06, Офиц. бюл. №15. 11 с.

Здобувачем виконано математичний опис і обґрунтування запропонованого способу дискретного управління електромагнітним підвісом обертових роторів, проведено числове і експериментальне підтвердження стійкості руху модельного ротора в електромагнітних підшипниках, керованих відповідно до способу.

90. Спосіб дискретного керування електромагнітним підвісом обертових роторів / Роговий Є.Д., Бухолдин Ю.С., Левашов В.О., Мартиненко Г.Ю., Смірнов М.М.: пат. на винахід 77665 Україна: МПК F16C 32/04. №2003076309; заявл. 08.07.03; опубл. 15.01.07, Бюл. №1/2007. 6 с.

Здобувачем виконано математичний опис і обґрунтування запропонованого способу дискретного управління електромагнітним підвісом обертових роторів, проведено числове і експериментальне підтвердження стійкості руху модельного ротора в електромагнітних підшипниках, керованих відповідно до способу.

АНОТАЦІЇ

Мартиненко Г.Ю. Динаміка роторів турбомашин в пасивних і активних магнітних підшипниках. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми зі створення нового загального способу математичного опису динамічної поведінки роторів в системах з магнітними підшипниками різних типів, який відрізняється узагальненістю підходу і повнотою врахування нелінійного взаємозв'язку процесів, що відбуваються в такій системі – електричних, магнітних і механічних, що дозволяє домогтися можливості адекватного моделювання та пошуку різних динамічних явищ і режимів роботи для знаходження раціональних або оптимальних варіантів конструкцій роторних машин зі зниженою віброактивністю і підвищеною надійністю, а також верифікація цього способу за допомогою порівняльного аналізу для експериментальної лабораторної моделі, що реалізує комбінований пасивно-активний магнітний підвіс ротора, і практичне його використання для аналізу та синтезу складних промислових роторних машин з магнітними підшипниками.

На основі розроблених способів, методик, алгоритмів і засобів моделювання, розрахунку та аналізу силових і жорсткісних характеристик пасивних і активних МП, а також динамічних характеристик роторів, встановлених в них, створено новий науково обґрунтований комплексний підхід до синтезу систем обпирання роторів турбомашин в повних магнітних підвісах, виходячи з результатів поглибленого варіан-

тного аналізу роторної динаміки, який відрізняється повнотою врахування різних чинників, властивостей і явищ, в тому числі нелінійних, підтверджений реалізацією лабораторної роторної установки з повним пасивно-активним магнітним підвісом і узгодженістю з достатньою точністю розрахункових і експериментальних даних, що має новизну, достовірність, теоретичне і практичне значення, та дозволяє знизити вібраційну навантаженість машини, її вартість і експлуатаційні витрати, підвищити динамічну стійкість, надійність і безвідмовність, а значить і конкурентоспроможність.

Ключові слова: лінійна і нелінійна роторна динаміка, пасивний магнітний підшипник, активний магнітний підшипник, комбінований магнітний підвіс, система управління, аналітична модель, імітаційна обчислювальна модель, аналіз динаміки роторів, магнітні сили, резонансні режими, динамічна стійкість.

Мартыненко Г.Ю. Динамика роторов турбомашин в пассивных и активных магнитных подшипниках. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин (13 – механическая инженерия). – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы по созданию нового общего способа математического описания динамического поведения роторов в системах с магнитными подшипниками различных типов, который отличается обобщенностью подхода и полнотой учета нелинейной взаимосвязи происходящих в такой системе процессов – электрических, магнитных и механических, что позволяет добиться возможности адекватного моделирования и поиска различных динамических явлений и режимов работы для нахождения рациональных или оптимальных вариантов конструкций роторных машин с пониженной виброактивностью и повышенной надежностью, а также верификация этого способа с помощью сравнительного анализа для экспериментальной лабораторной модели, реализующей комбинированный пассивно-активный магнитный подвес ротора, и практическое его использование для анализа и синтеза сложных промышленных роторных машин с магнитными подшипниками.

Во введении изложена краткая история развития науки, касающаяся предмета и объекта исследований, дано обоснование выбора темы исследований, приведены основные характеристики работы с указанием актуальности, научной новизны, практической ценности, а также обозначена связь работы с научными программами, планами, темами.

В первой главе рассмотрены история, актуальные проблемы, методы и средства анализа явлений роторной динамики с учетом традиционных и магнитных подшипников. Выполнен подробный обзор литературных источников и дана оценка современного состояния вопросов, относящихся к роторной динамике с учетом использования в роторных системах различных типов подшипников. Сделан выбор перспективных направлений исследований, сформулированы их цели и задачи.

Предложенный во второй главе подход к моделированию динамического поведения роторов турбомашин с магнитными подшипниками различных типов позво-

ляет комплексно и всеобъемлюще устранить недостатки существующих математических моделей динамики роторов в МП и учесть все практически значимые виды и причины нелинейного поведения системы «ротор в МП», определенные в ходе анализа современного состояния проблемы.

В третьей главе представлены результаты исследований по разработке подходов к созданию уникальных способов, алгоритмов и устройств управления АМП. Физическая реализация выполнена для одного из возможных вариантов полного магнитного подвеса ротора, включающего один осевой АМП и два радиальных ПМП. Для этой лабораторной установки ротора в комбинированном магнитном подвесе, являющейся прототипом полных магнитных подвесов мало- и среднеразмерных роторных машин, представлены подробные экспериментальные данные.

Четвертая глава посвящена практическому применению разработанных подходов к математическому описанию динамики роторов в магнитных подшипниках пассивного и активного типа на примере лабораторной установки. Основной целью является идентификация и доказательство адекватности предложенных методик математического определения параметров МП и основных характеристик динамики роторов, способа анализа электромагнитных цепей АМП, а также способа математического моделирования различных, в том числе нелинейных, явлений роторной динамики, наблюдаемых в системах с МП, на примере лабораторной установки.

В пятой главе рассмотрены вопросы использования предложенных методик и способов для разработки и создания магнитных опор роторов турбомашин энергетического машиностроения, таких как детандер компрессорный агрегат для производства сжиженного природного газа, обеспечивающих требуемые жесткостные характеристики в частности и необходимые динамические параметры вообще во всем диапазоне от нуля до рабочих оборотов вращения. Кроме того, на основе созданных подходов производится моделирование явлений роторной динамики, происходящих в различных энергетических роторных машинах, а именно: детандер-компрессорном агрегате и энергетической газотурбинной установке.

В выводах указана научно-прикладная проблема, которая решена в работе, изложены наиболее важные научные и практические результаты, даны сведения и рекомендации по внедрению результатов.

Таким образом, на основе разработанных способов, методик, алгоритмов и средств моделирования, расчета и анализа силовых и жесткостных характеристик пассивных и активных МП, а также динамических характеристик роторов, установленных в них, создан новый научно обоснованный комплексный подход к синтезу систем опирания роторов турбомашин в полных магнитных подвесах, исходя из результатов углубленного вариантного анализа роторной динамики, отличающийся полнотой учета различных факторов, свойств и явлений, в том числе нелинейных, подтвержденный реализацией лабораторной роторной установки с полным пассивно-активным магнитным подвесом и согласованностью с достаточной точностью расчетных и экспериментальных данных, обладающий новизной, достоверностью, теоретическим и практическим значением, и позволяющий снизить вибрационную нагруженность машины, ее стоимость и эксплуатационные затраты, повысить динамическую устойчивость, надежность и безотказность, а значит и конкурентоспособность.

Ключевые слова: линейная и нелинейная роторная динамика, пассивный магнитный подшипник, активный магнитный подшипник, комбинированный магнитный подвес, система управления, аналитическая модель, имитационная вычислительная модель, анализ динамики роторов, магнитные силы, резонансные режимы, динамическая устойчивость.

Martynenko G.Yu. Dynamics of turbomachines rotors in passive and active magnetic bearings. – Manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines (13 – Mechanical Engineering). – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis deals with a solution of the scientific and applied problems of creating a new general method for the mathematical description of the dynamic behavior of rotors in systems with magnetic bearings of various types that is characterized by a generalization of the approach and the completeness of taking into account the nonlinear interconnection of the processes occurring in such a system – electrical, magnetic and mechanical ones, which allows achieving the possibility of adequate modeling and searching for various dynamic phenomena and operating modes for finding rational or optimal designs of rotor machines with a reduced vibroactivity and increased reliability, as well as the verification of this method by means of a comparative analysis for the experimental laboratory model realizing the combined passive-active magnetic suspension of the rotor and its practical use for an analysis and a synthesis of complex industrial rotor machines with magnetic bearings.

Based on the developed methods, techniques, algorithms and tools for modeling, calculating and analyzing the strength and stiffness characteristics of passive and active magnetic bearings, as well as the dynamic characteristics of the rotors installed in them, a new scientifically grounded complex approach for a synthesis of rotor support systems of turbomachines in full magnetic suspensions is created on a basis of the results of an in-depth variant rotor dynamics analysis. It is characterized by a completeness of taking into account various factors, properties and phenomena, including nonlinear ones, and is verified by a realization of a laboratory rotor installation with a full passive-active magnetic suspension and a consistency of calculated and experimental data with a sufficient accuracy. This approach has novelty, authenticity, theoretical and practical value, and allows to reduce the vibration loading of the machine, its production and operating costs, as well as to increase the dynamic stability and reliability, and hence a competitiveness.

Keywords: linear and nonlinear rotor dynamics, passive magnetic bearing, active magnetic bearing, combined magnetic suspension, control system, analytical model, simulation calculation model, rotor dynamics analysis, magnetic forces, resonance modes, dynamic stability.



Підписано до друку 17.10.2018 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 1,9.
Гарнітура Times New Roman. Тираж 100 прим. Замовлення № 41

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФО-П Миронов М.В.)
Свідоцтво ВО4№022953
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua
