

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора  
**Аврамова Костянтина Віталійовича,**  
завідувача відділом надійності та динамічної міцності  
інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного  
НАН України  
на дисертаційну роботу

**Назіна Володимира Іосифовича**

«Динаміка здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання агрегатів  
енергоустановок»,

що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Дисертаційна робота Назіна В.І. присвячена дослідженню динаміки здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання рідинного тертя агрегатів енергоустановок.

Метою даної роботи є підвищення несучої та демпфуючої здатності і розширення діапазону стійкої роботи опор роторів швидкохідних машин.

Проведені комплексні дослідження дозволили встановити суттєві переваги здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання в порівнянні зі звичайними втулковими підшипниками по статичним і динамічним характеристикам.

### **I. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Тенденція зростання швидкостей обертання роторів сучасних швидкохідних машин, з метою зменшення їх габаритів, призводить до підвищення віброперевантажень і зростанню амплітуд коливань ротора в середині підшипника. Тому виникає необхідність розробці принципово нових вібростійких конструкцій гідростатодинамічних підшипників ковзання рідинного тертя. Одним з варіантів вирішення даної проблеми є запропоновані і запатентовані автором даної роботи конструкції здвоєних гідростатодинамічних підшипників з декількома мастильними шарами, які дозволяють суттєво поліпшити динамічні характеристики опор ковзання агрегатів енергоустановок.

Таким чином дослідження динаміки здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання є актуальною проблемою для машинобудівної галузі.

### **II. Коротка характеристика змісту роботи**

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Текст дисертації складається зі вступу, дев'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 367 сторінок, у тому числі 254 сторінки основного тексту зі 145

рисунками, список використаних джерел зі 168 найменуваннями на 17 сторінках та 3 додатків на 25 сторінках.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано проблему, мету, об'єкт і предмет дослідження, визначено новизну, практичну цінність і наведено інформацію про публікації та апробацію викладеного в роботі матеріалу, а також відзначено особистий внесок здобувача.

У **першому** розділі наведено характер роботи опор роторів агрегатів енергоустановок і вимоги, що пред'являються до них. Встановлено, що основними особливостями роботи опор роторів агрегатів енергоустановок є нестационарність навантаження, високі частоти обертання роторів і, як наслідок цих факторів зростання віброперевантажень та амплітуд коливань роторів в середині підшипника.

Виконано ретельний аналіз сучасного стану вирішення задач динаміки гідростатодинамічних підшипників ковзання. Автором даної роботи було прийнято рішення провести дослідження динаміки підшипників ковзання рідинного тертя у найбільш загальної постановці з використанням нелінійних рівнянь руху центру шипа в середині підшипника, що дозволило дослідити як зони резонансу, так і межі де виникають самозбуджуючі коливання (автоколивання) і настає нестійкий режим роботи ротора в середині підшипника.

У **другому** розділі наведена математична модель радіального здвоєного гідростатодинамічного підшипника при дії постійного зовнішнього навантаження. При визначенні основних характеристик підшипника спільно розв'язувались рівняння балансу витрат робочої рідини і рівнянь Рейнольдса. Ці рівняння узагальнено на випадок турбулентної течії робочої рідини за допомогою коефіцієнтів турбулентності, які визначались за допомогою найбільш поширеного в даний час методу В.Н. Константинеску. Рівняння Рейнольдса в даний час не мають точного аналітичного розв'язку. Тому для його розв'язання в даній роботі було застосовано найбільш раціональний метод скінченних різниць.

Наведені в розділі вирази записані в безрозмірному вигляді.

У **третьому** розділі наведена математична модель радіального гідростатодинамічного підшипника при нестационарному зовнішньому навантаженні. Динаміка підшипника у даному випадку аналізувалась за допомогою амплітудно-частотних характеристик, які дозволяють аналізувати як зони резонансу, так і межі де виникають самозбуджуючі коливання (автоколивання) і настає нестійкий режим роботи ротора в середині підшипника. Визначення аналітико-частотних характеристик підшипника пов'язано зі спільним розв'язанням рівнянь балансу витрат робочої рідини, рівнянь Рейнольдса і рівнянь руху вала в середині підшипника. Рівняння руху вала в середині підшипника записані в нелінійному вигляді і в проекціях на рухомі осі координат.

Для чисельної реалізації рівнянь руху в середині підшипника автор роботи проаналізував різні методи розв'язання диференціальних рівнянь: Ейлера, Рунге-Кутта, Мілна і Адамса. В результаті проведеного аналізу був

прийнятий найбільш раціональний багатокроковий метод Адамса четвертого порядку. Перші три кроки розраховувались за допомогою однокрокового метода Ейлера.

У **четвертому** розділі розглянуто математичну модель здвоєного радіально-упорного гідростатодинамічного підшипника при нестационарному зовнішньому навантаженні. Цей підшипник може сприймати двосторонні осьові і радіальні навантаження.

Для аналізу динамічних явищ, що відбуваються в опорах вала, використовувались амплітудно-частотні характеристики. Побудова амплітудно-частотних характеристик пов'язана зі спільним розв'язанням рівнянь Рейнольдса, балансу витрат і рівнянь руху вала з диском в середині підшипника. У рівнянні Рейнольдса, записаному для зовнішньої конічної поверхні підшипника, введено доданок, який враховує вплив відцентрових сил інерції робочої рідини. Для зовнішньої конічної частини підшипника записані вирази для радіального, осевого та нормального зазорів.

Для розв'язання рівнянь Рейнольдса застосовано найбільш поширений в даний час метод скінченних різниць.

При розв'язанні динамічної задачі використовувались нелінійні рівняння руху жорсткого одномасового ротора в середині підшипника.

Розроблено алгоритм реалізації наведеної математичної моделі.

У **п'ятому** розділі наведено математичну модель здвоєного гідростатодинамічного підшипника з пружною установкою робочих поверхонь диска при нестационарному зовнішньому навантаженні.

Даний підшипник можна розглянути як подальший розвиток конструкції здвоєного радіального гідростатодинамічного підшипника, у якого була відсутня пружна установка робочих поверхонь диску. У розглянутого підшипника робочі поверхні диска виконано роздільно з тілом диска і з'єднано з ним за допомогою пружних елементів. Пружний елемент може бути як металевим, так і гумовим. При правильному підборі пружних елементів розглянута конструкція підшипника дозволяє поліпшити його демпфуючі властивості і розширити діапазон стійкої роботи вала.

У **шостому** розділі наведено конструкції різних типів здвоєних гідростатодинамічних підшипників і їх 3Д – моделі. На розроблені конструкції здвоєних гідростатодинамічних підшипників отримано п'ять патентів.

У **сьомому** розділі розглянуто результати теоретичних досліджень трьох типів здвоєних гідростатодинамічних підшипників при стаціонарному і нестационарному зовнішньому навантаженні. Наведені результати свідчать про суттєві переваги здвоєних гідростатодинамічних підшипників в порівнянні зі звичайними втулковими гідростатодинамічними підшипниками як по статичним, так і по динамічним характеристикам. Діапазон стійкої роботи здвоєних підшипників приблизно в 1,4-1,5 разів більше діапазону стійкої роботи звичайного втулкового підшипника. Амплітуда коливань в зоні резонансу у здвоєного підшипника значно менше, приблизно в 1,5 рази, в порівнянні з втулковим підшипником. Це

підтверджує, що здвоєний підшипник має значно більшу демпфіруючу здатність у порівнянні зі звичайним втулковим підшипником.

Заслуговує особливої уваги результат одержаний для здвоєного гідростатодинамічного підшипника з пружною установкою робочих поверхонь диска, у якому показано наявність двох критичних частот обертання ротора в зоні резонансу.

**Восьмий** розділ присвячено експериментальним дослідженням підшипників здвоєного типу. В розділі чітко сформульована мета експериментальних досліджень, яка полягає в перевірці працездатності гідростатодинамічних підшипників здвоєного типу, підтвердженні розроблених математичних моделей і результатів розрахунку, отриманих на основі цих моделей, а також порівняння статичних і динамічних характеристик здвоєних і втулкових гідростатодинамічних підшипників. Для досягнення поставленої мети була розроблена програма експериментальних досліджень.

При виконанні даної роботи проводилися вибіркові експериментальні дослідження, які мають значний науковий і практичний інтерес.

Проведені дуже складні експериментальні дослідження підтвердили працездатність здвоєних гідростатодинамічних підшипників і їх значні переваги по статичним та динамічним характеристикам в порівнянні зі звичайними втулковими підшипниками.

У **дев'ятому** розділі на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень, а також з урахуванням існуючого на цей час досвіду проектування гідростатодинамічних підшипників звичайного втулкового типу, розроблені рекомендації щодо проектування підшипників здвоєного типу.

У **висновках** сформульовано перелік основних наукових і практичних результатів одержаних в дисертаційній роботі.

У **додатках** наведено список публікацій здобувача, текст програми розрахунку здвоєних гідростатодинамічних підшипників на мові «Сучасний фортран», а також акти впровадження результатів дисертації.

### **III. Наукова новизна роботи**

Наукова новизна роботи полягає в тому, що у ній вперше отримані такі наукові результати, які за сукупністю вирішують проблему створення теоретичних основ проектування і аналізу динаміки здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання.

1. Обґрунтовано можливість підвищення несучої і демпфуючої здатності, розширення діапазону стійкої роботи шляхом створення здвоєних гідростатодинамічних підшипників із декількома шарами змащування.

2. Створено та верифіковано за експериментальними даними математичні моделі здвоєних гідростатодинамічних підшипників, які забезпечують визначення траєкторії руху ротора, амплітудно-частотні характеристики і межі стійкості обертання ротора за відомими конструктивними і робочими параметрами.
3. Теоретично і експериментально досліджено вплив конструктивних та робочих параметрів здвоєних гідростатодинамічних підшипників на їх статичні і динамічні характеристики.
4. Теоретично обґрунтовано наявність двох критичних частот обертання у здвоєних гідростатодинамічних підшипників з пружною установкою робочих поверхонь диска.
5. Розроблено та запатентовано принципово нові конструкції гідростатодинамічних підшипників здвоєного типу, що дозволяють істотно удосконалити статичні і динамічні характеристики опор роторів агрегатів енергоустановок.

#### **IV. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що**

1. на їх основі можна проектувати різні типи здвоєних гідростатодинамічних підшипників для агрегатів енергоустановок;
2. наведені математичні моделі дозволяють досліджувати динаміку здвоєних гідростатодинамічних підшипників і аналізувати межі, де виникають автоколивання вала в середині підшипника;
3. використання здвоєних гідростатодинамічних підшипників в агрегатах енергоустановок дозволяє значно зменшити їх габарити, вагу і втрати потужності на терті.

Результати роботи були використані під час проектування паливних насосів на ПАТ «ФЕД» та гідростатичних підшипників для турбін на ПАТ «Турбоатом», про що свідчать акти впровадження.

Про практичне значення роботи свідчать також отримані дисертантом патенти.

#### **V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів**

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів базується на використанні існуючого досвіду в дослідженні гідростатодинамічних підшипників втулкового типу, коректністю постановки задачі і прийнятих припущень, використанням найбільш поширених і ефективних чисельних методів, підтвердженням результатів розрахунків експериментальними дослідженнями, а також позитивним ефектом від впровадження отриманих результатів.

## **VI. Повнота викладених наукових положень та висновків**

За результатами досліджень опубліковано 37 наукових праць, у тому числі 25 статей у журналах і збірниках наукових праць, включених до переліку наукових фахових видань України та міжнародні бібліометричні і наукометричні бази даних, 5 патентів на винаходи та корисні моделі, 7 матеріалів та тез доповідей на міжнародних конференціях.

Публікації є по кожному розділу дисертації.

Автореферат дисертації Назіна В.І. повністю відображає зміст і суть результатів досліджень, наведених в дисертації.

## **VII. Оформлення дисертації**

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація оформлена згідно вимог до оформлення. Стиль викладання наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

## **VIII. Зауваження до дисертації**

1. В припущеннях до рівняння Рейнольдса записано, що робоча рідина Ньютонівська, однак нема пояснення, які робочі рідини можна вважати Ньютонівськими.
2. При проведенні експериментів вимірювання проводилися при встановлювальному температурному режимі і не пояснено, чому температуру робочої рідини в робочому тракті підшипника можна вважати постійною.
3. Запропоновані автором роботи і запатентовані здвоєні гідростатодинамічні підшипники мають багато суттєвих переваг в порівнянні з втулковими підшипниками, однак в роботі не згадується о недоліках цих підшипників.

## **ВИСНОВОК**

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота Назіна Володимира Іосифовича «Динаміка здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання агрегатів енергоустановок» є завершеною науковою працею, в який містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, що полягає в аналізі динаміки здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання з метою підвищення несучої і демпфуючої здатності і розширення діапазону стійкої роботи. Сформульована кінцева мета досягнена – розроблені принципово нові конструкції вібростійких здвоєних гідростатодинамічних підшипників з декількома мастильними шарами, що дозволяють істотно підвищити несучу та демпфуючу здатність і розширити діапазон стійкої роботи валів агрегатів

енергоустановок. Розроблені рекомендації щодо проектування здвоєних гідростатодинамічних підшипників.

Тому дисертаційна робота «Динаміка здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання агрегатів енергоустановок» повністю відповідає вимогам пунктів 10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13р. № 567, а її автор, Назін Володимир Іосифович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 «Динаміка та міцність машин».

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач відділом надійності та  
динамічної міцності Інституту проблем  
машинобудування ім. А.М. Підгорного  
Національної академії наук України



К.В. Аврамов

*Дізнаю К.В. Аврамова завідувачем.*  
*Г. скар. Машин ННМ Закарпатської обл. І. П. Н.*  
*К.В. Машинишова - Аврамов*

