

ВІДГУК

офіційного опонента 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 динамічних явищ, які відбуваються в гідростатодинамічних підшипників ковзання рідинного тертя з декількома мастильними шарами. Метою роботи є підвищення несучої та демпфуючої здатності і розширення діапазону стійкої роботи опор роторів агрегатів енергоустановок завдяки створенню здвоєних підшипників зазначеного типу.

Актуальність теми дисертаційної роботи. Необхідність ретельного дослідження динаміки сучасних швидкохідних машин обумовлена підвищенням частоти обертання їх роторів. Працездатність і надійність машин багато в чому залежить від динамічних характеристик системи ротор-підшипники. Тому виникає необхідність удосконалення існуючих конструкцій підшипників ковзання рідинного тертя, або створення принципово нових вібростійких підшипників ковзання.

Для вирішення існуючої проблеми здобувачем запропоновані і запатентовані принципово нові конструкції здвоєних гідростатодинамічних підшипників з декількома мастильними шарами. Ці підшипники дозволяють суттєво підвищити несучу та демпфуючу здатність і розширити діапазон стійкої роботи опор роторів агрегатів енергоустановок. Таким чином дослідження динаміки здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання є актуальною проблемою для машинобудівної галузі.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що у ній вперше отримані наукові результати, які за сукупністю вирішують проблему створення теоретичних основ для динамічного аналізу та проектування здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання. Здобувачем обґрунтовано можливість підвищення несучої і демпфуючої здатності, розширення діапазону стійкої роботи шляхом створення здвоєних гідростатодинамічних підшипників із декількома шарами змащування. В роботі 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. Здобувачем теоретично і експериментально досліджено вплив конструктивних та робочих параметрів здвоєних гідростатодинамічних підшипників на їх статичні і динамічні характеристики, теоретично обґрунтовано наявність двох критичних частот обертання у здвоєних гідростатодинамічних підшипників з пружною установкою робочих поверхонь диска, розроблено та запатентовано принципово нові конструкції здвоєних гідростатодинамічних підшипників, які дозволяють істотно удосконалити статичні і динамічні характеристики опор роторів агрегатів енергоустановок.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено математичні моделі для трьох типів здвоєних гідростатодинамічних підшипників, які дозволяють визначати статичні й динамічні характеристики вузла на стадії проектування. Впровадження цих підшипників в машинобудівної галузі дозволить суттєво підвищити надійність і довговічність опор роторів, а також агрегатів енергоустановок в цілому.

Акти впровадження свідчать про те, що результати роботи було використано під час проектування паливних насосів на ПАТ «ФЕД» та гідростатичних підшипників для турбін на ПАТ «Турбоатом». Використання здвоєних підшипників для потужних турбін атомних електростанцій дозволить суттєво зменшити втрати потужності на тертя і вагу цих турбін. Про практичне значення роботи також свідчать отримані дисертантом 5 патентів на винаходи.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечується коректністю постановки задачі і прийнятих припущень, використанням існуючого досвіду в дослідженні звичайних втулкових підшипників і найбільш раціональних чисельних методів, задовільним узгодженням розрахункових і експериментальних даних, а також позитивним ефектом від впровадження отриманих результатів.

Коротка характеристика змісту роботи. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Її текст складається зі вступу, 9-ти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3-ох додатків. Загальний обсяг становить 367 сторінок, у тому числі 254 сторінки основного тексту зі 145 рисунками, список використаних джерел зі 168 найменуваннями на 17 сторінках та додатки на 25 сторінках.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну одержаних результатів, практичну цінність, зв'язок з науковими програмами, планами, темами, наведено інформацію про публікації та апробацію викладеного в роботі матеріалу, а також відзначено особистий внесок здобувача.

У **першому** розділі виконано системний аналіз методів дослідження динаміки підшипників ковзання рідинного тертя, існуючих на даний час. У найбільш загальній постановці з відомих досліджень виконано роботи, де траєкторії руху центру шипа визначаються на основі спільного розв'язання рівнянь гідромеханіки мастильного шару і нелінійних рівнянь руху шипа у підшипнику. Така постановка задачі дозволяє розраховувати амплітудно-частотні характеристики і досліджувати зони резонансу, межу стійкого руху осі ротора, а також автоколивання.

У **другому** розділі розв'язана задача по визначенню розподілу тиску в шарі робочої рідини за умови, що вісь ротора є нерухомою. Для цього необхідно знайти спільний розв'язок рівнянь балансу витрат робочої рідини і Рейнольдса для мастильного шару. Для витрат через вхідні компенсуючі пристрої була використана відома формула гідравліки. Втрати по контуру камер записані з урахуванням переносної і градієнтної течії рідини. Для розв'язання рівнянь Рейнольдса був використаний метод скінченних різниць. Різницеві схеми, що використані в даній роботі, є неявними; в порівнянні з явними вони мають більшу стійкість і не вимагають жорсткого обмеження по кроку сітки. Проте це призводить до необхідності розв'язувати системи алгебраїчних рівнянь. Кінцеві вирази для визначення основних характеристик підшипника записані в безрозмірному вигляді.

У **третьому** розділі розроблена математична модель роботи здвоєного радіального гідростатодинамічного підшипника, яка, крім визначення розподілу тиску в шарі робочої рідини, враховує радіальний та осевий рух ротора. Обрано найбільш загальний підхід до вирішення задач динаміки, який полягає в визначенні амплітудно-частотних характеристик коливального руху ротора в середині підшипника.

Такий підхід дозволяє точніше визначати зони резонансу і межі стійкості у порівнянні зі звичайною лінійною або лінеаризованою постановкою задачі дослідження на динамічну стійкість. У даній роботі динамічна задача розв'язана з використанням нелінійних рівнянь руху жорсткого одномасового ротора, встановленого на двох гідростатодинамічних підшипниках здвоєного типу. Для чисельного моделювання здобувачем проаналізовано 4 відомі методи розв'язання систем диференціальних рівнянь та обрано метод Адамса, який заснований на зміні шуканого розв'язка частковою сумою його розкладення в ряд Тейлора. За умови асимптотичної стійкості перехідних процесів, цей метод забезпечує невисоку похибку при довготривалих розрахунках. Наприкінці розділу описано алгоритм реалізації наведеної математичної моделі.

У **четвертому** розділі аналогічну модель та алгоритм розрахунку розроблено для здвоєного радіально-упорного підшипника. Завдяки двом конічним поверхням підшипник сприймає двосторонні осьові навантаження спільно з радіальними. При запису балансу витрат і рівнянь Рейнольдса враховані особливості роботи цього підшипника. Баланс витрат для зовнішньої конічної частини підшипника представлено в інтегральній формі, а швидкості робочої рідини у зазорі враховано змінними за радіусом підшипника. У рівнянні Рейнольдса для зовнішньої конічної частини враховано дію відцентрових сил інерції робочої рідини.

У **п'ятому** розділі розроблено математичну модель роботи здвоєного радіального підшипника з пружною установкою робочих поверхонь диска. Конструкція підшипника була також розроблена і запатентована здобувачем. За результатами моделювання показано, що підбором характеристик пружних елементів можна змінювати демпфуючі здатності підшипника. У математичній моделі спільно розв'язувалися рівняння руху вала в середині підшипника і рівняння руху кілець на пружній основі. Рівняння переміщень кілець були записані для випадку вимушених коливань. Крім сил пружності і демпфування еластичних елементів враховані також прикладені зовні збуджуючі гідродинамічні сили.

У **шостому** розділі наведено конструкції, принцип роботи і 3Д – моделі різних типів здвоєних гідростатодинамічних підшипників, на які здобувачем одержано 5 патентів. Заслугове особливої уваги конструкція радіального підшипника з самоустановлювальними сегментами, що повертаються відносно сферичних поверхонь втулок. Конструкція дозволяє компенсувати перекося валу і додатково підвищує демпфуючу здатність підшипника та розширює діапазон стійкої роботи.

У **сьомому** розділі наведено хід та результати теоретичного дослідження статичних і динамічних характеристик для різних типів здвоєних підшипників. Дослідження проводилися в широкому діапазоні зміни конструктивних і робочих параметрів підшипника. Результати розрахунків підтверджують значну перевагу здвоєних гідростатодинамічних підшипників в порівнянні зі звичайними втулковими підшипниками, як за статичними, так і за динамічними характеристиками.

Встановлено, що вплив основних конструктивних і робочих параметрів на статичні і динамічні характеристики одинарних і здвоєних підшипників якісно аналогічні. Так, в обох випадках, збільшення неврівноваженості ротора мало впливає на діапазон стійкої роботи та критичні швидкості і сильно впливає на амплітуди коливань, особливо при наближенні до резонансу. Визначено, що в стійкій області ротор здійснює змушені коливання з обертальною частотою, а на межі стійкості до

них додаються автоколивання, що мають меншу частоту. З'ясовано, що в стійкій зоні траєкторії центру вала близькі до кола або еліпсу, а на межі стійкості мають більш складний характер. Одержані результати і висновки, що зроблено за результатами теоретичних досліджень, цілком відповідають фізичним процесам, які відбуваються при роботі гідростатодинамічних підшипників.

У **восьмому** розділі наведено методику та результати експериментального дослідження гідростатодинамічних підшипників здвоєного типу, що є дуже важливою складовою дисертаційної роботи. Експериментальні дослідження мали вибіркового характеру і проводилися на досить складному стенді. Для їх проведення були виготовлені здвоєні гідростатодинамічні підшипники і експериментальний вузол. Конструкція дозволяла за рахунок зміни дроселів на заглушки перетворювати здвоєний підшипник в звичайний втулковий, що відкрила можливість порівняльного аналізу динамічних характеристик.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили результати і висновки, отримані при теоретичних дослідженнях. Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало їх задовільне узгодження.

Дев'ятий розділ присвячено розробці рекомендацій щодо проектування підшипників здвоєного типу. При цьому був використаний існуючий досвід проектування звичайних втулкових підшипників, а також результати досліджень, проведених в даній роботі.

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

У **додатках** наведено список публікацій здобувача, текст програми розрахунку здвоєних підшипників, а також акти впровадження результатів дисертації.

Оформлення дисертації. Дисертація оформлена згідно вимог. Стиль викладання матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

Повнота викладення результатів роботи у наукових працях. 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 міжнародних бібліометричних і наукометричних баз даних, 5 патентів на винаходи, 7 матеріалів та тез доповідей на міжнародних конференціях.

Усі публікації є одноосібними. Публікації є по кожному розділу дисертації.

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації.

Зауваження офіційного опонента до дисертації:

1. В роботі не проаналізовано властивості та не наведено перелік робочих рідин, що можуть бути використані у запропонованих підшипниках та до яких можна застосовувати розроблені здобувачем методи математичного моделювання.

2. У важконавантажених підшипниках, де можливі великі втрати на тертя, необхідно було б врахувати зміну в'язкості робочої рідини по довжині зазору.

3. В дисертації не оцінено впливи помилок виготовлення робочих поверхонь підшипника та їх термопружних деформацій на розподіли тиску в мастильних шарах робочої рідини; ймовірно ці впливи мали, і їх можна не враховувати, але, як відомо, для деяких інших опор ковзання вони є вкрай суттєвими.

4. В першому розділі згадується про аналітичні методи дослідження на стій-

кість, проте вони не використовувалися в розроблених автором методах динамічного аналізу здвоєних підшипників.

5. В роботі не враховувалися коливання тиску в системі подачі робочої рідини в підшипник, і немає пояснення, чому цими коливаннями можна знехтувати.

6. В заголовках розділів 3,4 і 5 замість слів «при нестаціонарному зовнішньому навантаженні» доречно було б записати «з урахуванням коливань вала».

7. В поясненнях к рівнянню (5.49) відсутні формули для гідродинамічної сили, яка діє на пружне встановлено кільце.

8. Розроблені математичні моделі не можна розповсюдити на всі запропоновані здобувачем конструкції підшипників, які наведено в розділі 6.

9. На рисунках розділу 7 показано декілька розрахункових траєкторій руху шипа, які з різних початкових положень збігаються к однаковій кінцевій точці, але перевірка вузла на абсолютну стійкість не проводилася.

10. В розділі 7 не показані розрахункові графіки коливань тиску в камерах, що ускладнює аналіз перехідних процесів.

11. В розділі 8 не наведені частотні характеристики індуктивних датчиків переміщень, які було використано при експериментальних дослідженнях руху вала.

Зауваження, які наведені вище, не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і носять характер побажань.

Висновок.

Дисертаційна робота Назіна В.І. «Динаміка здвоєних гідростатодинамічних підшипників ковзання агрегатів енергоустановок» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, що полягає в аналізі динамічних властивостей новітнього сімейства підшипників оригінальної конструкції, які створюються та впроваджуються у виробництво з метою підвищення несучої і демпфуючої здатності та розширення діапазону стійкої роботи опор роторів сучасних швидкохідних машин. Робота за актуальністю, науковою новизною отриманих результатів, їх достовірністю та практичною значимістю задовольняє вимогам ДАК України і пп. 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Кабінетом Міністрів України № 567 щодо докторських дисертацій, а її автор Назін Володимир Іосифович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 «Динаміка та міцність машин».

Офіційний опонент

професор кафедри вищої математики
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
доктор технічних наук, професор

Григор'єв

Григор'єв О.Л.

11.10.2018 р.

Підпис д.т.н., проф. Григор'єва О.Л. засвідчує

вчений секретар НТУ «ХПІ»



О.Ю. Заковортний

О.Ю. Заковортний