**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЛЬНИХ ГАЗОВИХ ПІДВІСІВ**

Шевченко Алла Володимирівна к.т.н., доцент
Гречанюк Микола Сергійович к.т.н., доцент
Вінницький національний технічний університет
Спирін Анатолій Володимирович к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

Shevchenko A.

Hrechanyuk M.

Vinnitsia National Technical University

Spirin A.

Vinnitsia National Agrarian University

Анотація: стаття присвячена експериментальному дослідженню газових підшипників, розробці методики експериментального виміру відновленого моменту у газостатичних циліндричних газових підвісах при асиметричному навантаженні.

Ключові слова: радіальний підшипник, відновлений момент, асиметричне навантаження, експериментальне дослідження.

Постановка проблеми

Важливим класом універсальних газових опор є так звані газові підвіси або, як їх ще називають, газостатичні підшипники.

Опори з газовим змащенням застосовуються в різних галузях промисловості, пов'язаних з необхідністю створення високотехнологічного обладнання, в якому використовувалися би надзвичайні переваги газу у порівнянні з рідиною. Переваги газових опор найбільшою мірою проявляються в високоточних вузлах виробів які працюють при незначних динамічних навантаженнях без великого діапазону зміни статичних. До недоліків можна віднести малу в'язкість газового шару, яка є причиною відносно невеликої піднімальної сили. Також газові опори мають нестійкі режими роботи при деяких значення їх конструктивних та експлуатаційних параметрів.

Тому актуальною є задача розробки методів розрахунку радіальних газових підвісів з однією профільованою зоною та визначення експериментальним шляхом їх відновленого моменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

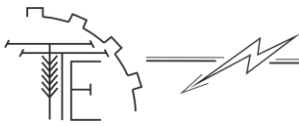
Проблемі, що розглядається, присвячено багато досліджень, на основі яких розроблено ряд методик і довідкових посібників. В роботі [6] теоретично і експериментально досліджений циліндричний підвіс, в який стислий газ поступає безпосередньо в робочий зазор, котрий поблизу відкритих границь підшипника різко звужується за рахунок ступенів на одній із робочих поверхонь. Такий підвіс тепер часто називають опорою Адамса [6], або ступінчастим підшипником [5]. Автори роботи [6] вважають, що потік газової змазки в робочому зазорі є чисто осьовим. Як слідує із більш пізніх і більш обґрунтованих робіт [1], [4], це припущення не відповідає дійсності і приводить до сильно завищених значень підйомної сили і жорсткості змащувального шару.

Мета даної статті полягає у вирішенні задачі визначення експериментальним шляхом відновленого моменту газостатичного циліндричного підвісу з однією щілиною наддування й однією профільованою зоною.

Виклад основного матеріалу

Пошук алгоритмів безрозмірних інтегральних характеристик циліндричних газостатичних підвісів з анізотропною геометрією робочого зазору засновувався на припущенні, що число канавок на валу підшипника достатньо велике в тому розумінні, що невеликим пилоподібним зміненням тиску в межах однієї пари можна позбутися. Експериментальні дослідження [4] показали, що такі характеристики радіальних підшипників із повздовжніми канавками, як підйомна сила, радіальна жорсткість і витрати стислого газу відрізняються від розрахункових, які отримані з врахуванням вищепоказаного припущення, не більше, ніж на 9% при числі канавок не менше 18. Збільшення числа канавок від 18 до 24 приводить до збільшення підйомної сили і радіальної жорсткості не більше, ніж на 1,7%, при цьому використання газу через опору залишається практично незмінним.

Тому при експериментальному визначенні відновленого моменту використовувалися вали підшипника із 24 канавками. Канавки мали прямокутну форму. Ширина їх була в три рази менше



відступів.

Для їх виготовлення використовувався алмазний круг, ширина якого дорівнювала ширині канавок ($b=1,63\text{мм}$). Торець цього круга попередньо профілювався іншим алмазним кругом із діаметром, який дорівнює діаметру вала підшипника (рис. 1а). Вихід шліфувального круга з канавок при вказаній технології їх нарізання приводив до того, що на ділянці 15 (рис. 1б) глибина канавок змінювалась від σ до 0. Довжина $l_5 = \sqrt{2t\sigma}$ відносно невелика, і, наприклад, для вала діаметром 50 мм, складає 1,3 мм. Як показали експериментальні досліди, відхилення від заданої глибини канавки на такій короткій ділянці на інтегральні характеристики підвісу впливає дуже слабо.

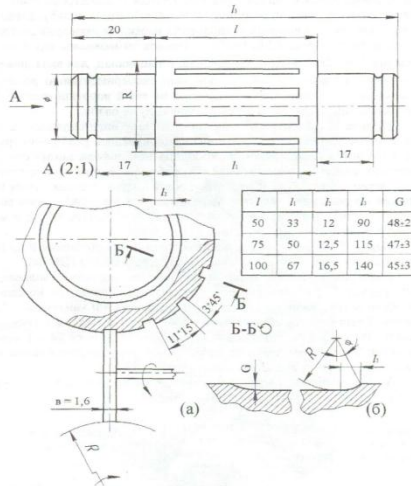


Рис. 1. Вал газового підвісу з повздовжніми канавками

Щілина надування циліндричного підвісу виготовлялась за такою технологією. Втулка підшипника виконувалась розбірною і в одній з її половинок на координатно-шліфувальному станку внутрішнє кільце довжиною $l=2\text{мм}$ робилось менше по відношенню до встановленої бази на величину, рівну ширині щілини. Після ретельного промивання і сушіння двох частин втулки підвісу вони збиралися за допомогою скалки, зовнішній діаметр якої був менше внутрішнього на 1,0 ...1,5 мкм.

Перед збиранням втулки, з метою зменшення зрушення її однієї половини щодо іншої, скалка змащувалась олією ВНИИ НП-408.

Експериментальний набір циліндричних підвісів складався з трьох втулок однакового діаметра, але різної довжини, до кожної з яких було виготовлено по два вала – з повздовжніми канавками і без канавок. Причому діаметральний зазор між гладким валом і втулкою складав $100 \pm 0,5$ мкм, що при ширині щілини надування 24 ± 1 мкм і її довжині 2 мм, є оптимальним, тобто таким, що забезпечує газовому підвісу максимальну радіальну жорсткість.

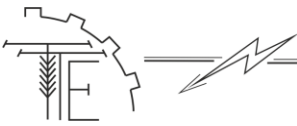
У безрозмірному вигляді параметри експериментальних радіальних підшипників виглядають так

Відношення ширини канавки до виступу ω	Відношення довжини опори до діаметра λ	Відношення довжини канавок до довжини підшипника α	Параметри щілини наддування, Ψ	
			вал з канавками	гладкий вал
	1,0	0,666	0,514	1,12
0,25	1,5	0,664	0,431	0,99
	2,0	0,669	0,358	0,89

Як видно з цієї таблиці, геометричні параметри експериментальних зразків близькі до оптимальних.

Експериментальні зразки газових підвісів виготовлялись зі сталі 1ПХ15, загартованої до $H \gamma = 640 \dots 680$.

Внутрішнє напруження в деталях підшипника знімалося штучним старінням при температурі $150^\circ \dots 160^\circ$ протягом 6...8 годин.



Для контролю розмірів і шорсткості поверхні опор використовувалася така апаратура: профілограф-профілометр моделі 201 заводу "Калібр"; Taliroad-73, Surtonik-2, Мис-11; вертикальний оптиметр типу ИКВ; індикатори типу ИК-1 (ціна поділки 1 мкм; межі виміру ± 100 мкм).

При експериментальному визначенні відновленого моменту у радіальних газових підвісів втулка 1 (рис. 2) підшипника кріпилася в двох призмах 2. Система навантаження дозволяла прикладати до вала як навантаження, перпендикулярне його осі, так і пару сил. Переміщення вала 3 під дією прикладеного навантаження вимірялося за допомогою індикаторів 4 типу ИК-1, встановлених у площині пари сил на однаковій фіксованій відстані від торців втулки, і двох ємнісних датчиків 5, встановлених у діаметрально протилежних індикаторах 4 точках вала.

Описана система виміру переміщення вала дозволила виключити можливий вплив деформації вала на точність виміру його кутових перекосів.

Навантаження вала тарованими вантажами здійснювалося в такий спосіб: вага вала 3 комплектувалась вантажами, встановленими на візках 6 і 9 (рис. 2), а потім після перевірки індикаторами 4 і датчиками 5 співосності втулки 1 і вала 3, навантажувалися однаковими вантажами візка 7 і 9 чи 8 і 6.

Ємнісний датчик, зображений на рис.3, складається з стержня 1 діаметром 5 мм і кільця 2 з внутрішнім діаметром 6мм і зовнішнім 7 мм, виготовлених з міді марки МІ. Довжина датчика 4мм. Стержень 1 і кільце 2 відділені один від одного і від корпусу 3 ебонітовими кільцями товщиною 1мм. В верхній частині корпусу вклеєна кулька 03 мм, яка опирається на поверхню кінцевої міри довжини. До корпусу за допомогою хомути і гвинтів кріпляться дві пружини зі сталі 70Г товщиною 0,3мм і шириною 7мм. Після збирання датчика всі пори заливаються епоксидною смолою ЕД-5. Вільні кінці пружини кріпляться гвинтом до основи 4, які в свою чергу кріпляться до кільця 5. Вертикальний паз в основі 4 дозволяє переміщувати ємнісний датчик в радіальному напрямі. Для того, щоб робочим поверхням датчиків надати кривизну вала, кільце 5 з закріпленими датчиками встановлюється в патрон шліфувального станка, і поверхні датчиків шліфуються по внутрішньому 048 мм. Кінцеве налагодження робочих поверхонь датчиків здійснювалось ручним затиранням. При цьому знімався шар не менше 0,12мм.

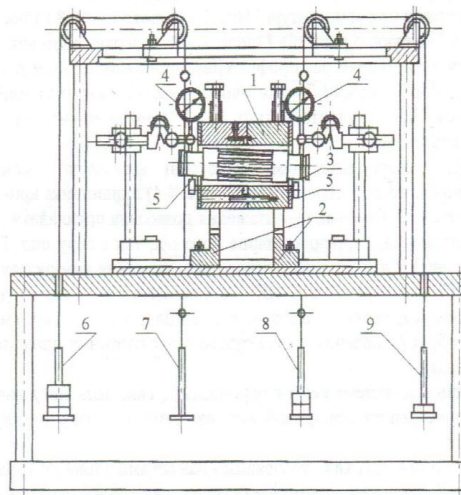
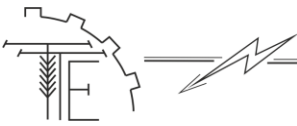


Рис. 2. Вал газового підвісу з повздовжніми канавками

Налагодження приладів для випробування радіальних підшипників з щільною наддування і протяжними канавками проводилась за допомогою пристрою, зображеного на рис. 4. Ємнісний датчик 3 щільно зв'язаний з масивною основою 1. Грубі вертикальні переміщення датчика здійснюються за допомогою мікрометричного гвинта 2 з ціною поділки 0,01 мм. Після складання пристрою з однієї установки досконало шліфується установочна база пристосування (три кульки $\varnothing 4$ мм; впресованих в основу 1 і робоча поверхня ємнісного датчика).

Під час роботи дане пристосування кріпиться прихоплювачами до масивної плити, робоча поверхня якої має чистоту $Ra = 0,125$ мкм. Трамбування всіх датчиків (рис.3 і рис.4) здійснювалось за допомогою мікронного набирання кінцевих мір довжини, як показано в роботі [5].

Виводи ємнісного датчика з'єднуються коаксіальним кабелем з каналом приладу для підшипника з однією щільною наддування (рис. 5), вимірювання малих переміщень ИМК-2К. Структурна схема приладу показана на рис. 5. Вона складається: 1- кварцовий генератор високої частоти



(10 МГц); 2 – підсилювач вузлом приладу є балансний міст 3, принципова схема якого показана на рис. 6. Трансформатором 1 з жорстким індуктивним зв'язком в точках 1.1 та 2.2 створюються дві напруги, однакові по амплітуді і зсунуті по фазі на 180°. Елементи R1, R2, R3 утворюють пасивний суматор. Вхідна напруга знімається з опора R3 суматора. До точок 1,1 під'єднується височастотний кабель вимірювального каналу, а до точок 2.2 - кабель комбінаційного каналу. Застосування двох каналів необхідне для виключення температурної похибки кабелю.

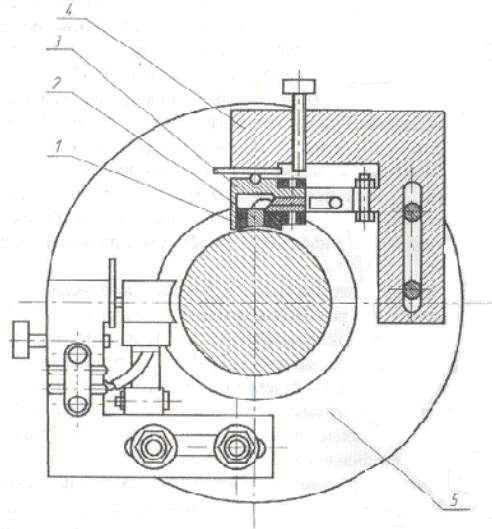


Рис. 3. Ємнісний датчик для вимірювання радіального зазору підшипників

Приладом ИМК-2К можна виміряти переміщення до 0,1 мкм. Характеристики приладу практично лінійні в діапазоні ± 40 мкм з початковим зазором 0,1 мм. Після прогрівання приладу протягом 0,5 години відхилення стрілки від нуля складає за 10 хвилин біля 0,05 мкм

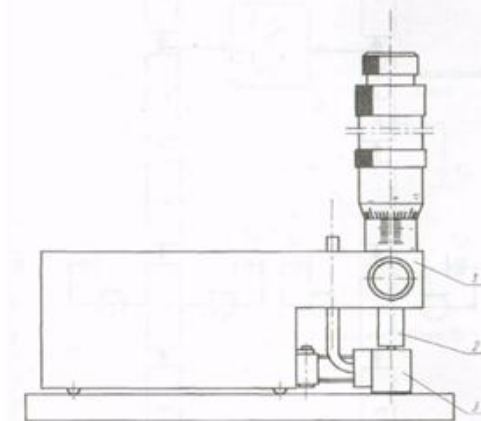


Рис. 4. Пристрій для налагоджування приладу ИМК-2К та вимірювання осевого биття вертикального шпиндельного вузла

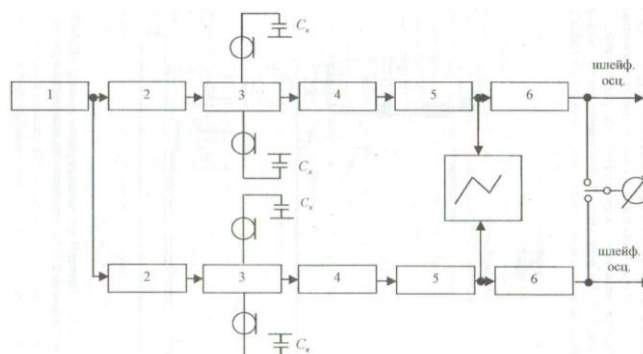


Рис. 5. Структурна схема приладу ИМК-2К

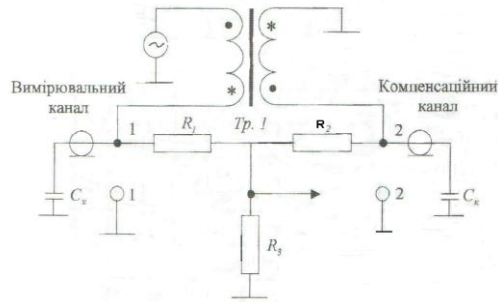
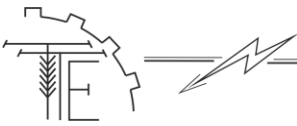


Рис. 6. Принципова схема балансного мосту (блок 3) приладу ИМК-2К

Експериментальні дослідження залежності безрозмірного відновленого моменту M^* від відносного кутового зміщення ϑ радіальних газових підвісів різної довжини показали, що як і у гладкого підшипника з однією щілиною наддування (рис. 7), так і у підшипника з щілиною наддування і профільованою зоною (рис. 8), залежність $M^* = f(\vartheta)$ практично лінійна у всьому діапазоні значень ϑ , причому кутова жорсткість відрізняється від розрахункової не більш, ніж на 15%. Ці результати були отримані для відносно невеликого безрозмірного тиску $P_H = 2$ (надлишковий тиск 0,1 МПа).

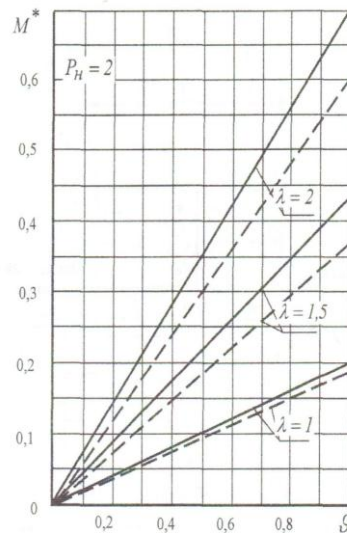


Рис. 7. Залежність безрозмірного моменту M^* від відносного кутового зміщення однощільного підшипника з повздовжніми канавками: ——— теоретична крива; - - - - експериментальна крива

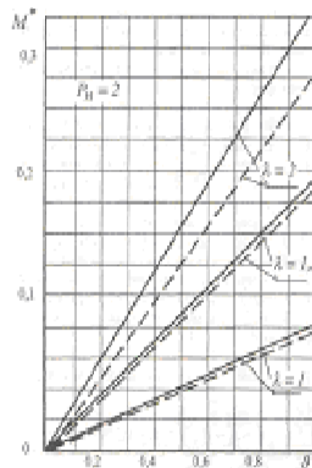
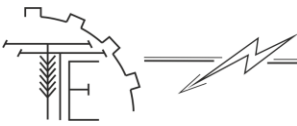


Рис. 8. Залежність безрозмірного відновленого моменту M^* від від відносного кутового зміщення підшипника з повздовжніми канавками: ——— теоретична крива; - - - - експериментальна крива



Викликано це тим, що для зменшення впливу похибок виготовлення щілини наддування. повздожніх канавок, похибок форми вала і втулки, а також похибок вимірів робочого зазору на результати проведених досліджень були спроектовані підшипники з завищеними радіальними зазорами.

Так, наприклад, у гладкого однощілинного підвісу величина зазору $c = 50$ мкм, а в щілинного підвісу з повздожніми канавками $c = 40 \pm 1$ мкм. Числа Рейнольдса в підшипників з такими зазорами вже при відносно невеликому надлишковому тиску 0.1 МПа змінюється від 100 до 350 у залежності від довжини опори, а критичне число Рейнольдса для ламінарної течії газу у зазорах підшипників не повинні перевищувати 550 [3], хоча в процесі експериментів число Рейнольдса доводилось іноді до 1500...2000 з метою знайти різкі зміни-характеристик опор (у підйомній силі, у відновленого моменту і особливо у витрат газу), але ніяких ознак, що свідчать про перехід ламінарного режиму в турбулентний, при цьому виявлено не було.

Висновки

У межах точності проведених експериментів виявлена досить висока відповідність між даними теоретичних методів і експериментальними яка близька до лінійної залежності відновленого моменту від величини кутового зміщення. Порівнянням даних чисельних методів із експериментальними даними доведено, що розроблені алгоритми забезпечують високу для практики точність розрахунків у робочому діапазоні кутових та радіальних зміщень завислої деталі підшипника.

Список літератури

1. Емельянов А.В. Исследование газостатических подшипников и улучшение их характеристик / А.В. Емельянов, В.А. Федотов, Г.Г. Дзюбинский // *Машиноведение*. 1976. -№ 3. - С. 96-105.
2. Емельянова Н.А. Теория радиально-осевых подвесов с зеркально симметричной геометрией и произвольно ориентированной малой несоосностью / Н.А. Емельянова, Л.С. Емельянова // *Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой: Тез. докл. всес. координац. совещ.*, -1983.-С. 10-11.
3. Као Н.С. Численный метод и приближения высшего порядка для анализа самогенерирующегося газового подшипника конечной длины / Н.С. Као // *Проблемы трения и смазки*. 1971. № 1. С. 88-93.
4. Хемминг Р.В. Численные методы / Р.В. Хемминг Р.В. -М.: Наука, 1972. -214с.
5. Шейнберг С. А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С. А. Шейнберг, В.П. Жедь, М.Д. Шизеев. - М.: Машиностроение, 1969. -331 с.
6. Eshghy S. Optimum design of multiple-hole inherently compensated air bearings. Part I. Circular Thrust Bearings. -Trans. ASME, 1975, vol. F97, N2, P. 221-227.

References

1. Yemel'yanov A.V. Issledovaniye gazostaticheskikh podshipnikov i uluchsheniye ikh kharakteristik / A.V. Yemel'yanov, V.A. Fedotov, G.G. Dzyubinskiy // *Mashinovedeniye*. 1976. -№ 3. - S. 96-105.
2. Yemel'yanova N.A. Teoriya radial'no-osevykh podvesov s zerkal'no SIMMETRICHNOYe geometriyey i proizvol'no oriyentirovannoy maloy nesoosnost'yu / N.A. Yemel'yanova, L.S. Yemel'yanova // *Issledovaniye i primeneniye opor skol'zheniya s gazovoy smazkoy: Tez. dokl. vses. koordinats. soveshch.*, - 1983.-S. 10-11.
3. Kao N.S. Mnogochislennyy metod i priblizheniya vysshego poryadka dlya analiza samogeneriruyushchegosya gazovogo podshipnika konechnoy dliny / N.S. Kao // *Problemy treniya i smazki*. 1971. № 1. S. 88-93.
4. Khemming R.V. Chislennyye metody / R.V. Khemming R.V. -M. : Nauka, 1972. -214s.
5. Sheynberg S. A. Opory skol'zheniya s gazovoy smazkoy / S. A. Sheynberg, V.P. Zhed', M.D. Shizeyev. - M. : Mashinostroyeniye, 1969. -331 s.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ПОДВЕС

Аннотация: статья посвящена экспериментальному исследованию газовых подшипников, разработки методики экспериментального измерения восстанавливающего момента в газостатических цилиндрических газовых подвесах при асимметрическом нагружении.

Ключевые слова: радиальный подшипник, восстанавливающий момент, асимметрическое нагружение, экспериментальное исследование.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GAS RADIAL SUSPENSION

Summary: the paper considers the experimental research of gas ball bearing, the development of methodics for experimental measurement of the renovated moment in gas static cylinder of gas ball bearing under the asymmetric loading.

Keywords: the gas ball bearing, the renovated moment in gas static, the asymmetric loading, the experimental research.