

УДК 62.229.315 (0 45)

О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, В.А. Радзієвський, О.Г. Ковальчук, О.В. Стельмах
Національний авіаційний університет
МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЯКОСТІ НЕРОЗБІРНИХ ШАРИКОПІДШИПНИКІВ ЗА
ВІБРОХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПІД ЧАС ЇХ ВІЛЬНОГО ВИБІГУ

У статті наведено аналіз відомих методик, систем та пристроїв визначення оцінки якості нерозбірних шарикопідшипників за їх віброхарактеристиками. Запропонована методика оцінки якості шарикопідшипників на розробленій системі контролю СКП з безконтактним приводом.

Ключові слова: нерозбірний шарикопідшипник, віброприскорення, віброшвидкість, вибіг, безконтактний привод

А.У. Стельмах, Р.Е. Костюник, В.А. Радзиевский, Е.Г. Ковальчук, А.В. Стельмах
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА НЕРАЗБОРНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ ПО
ВИБРОХАРАКТЕРИСТИКАМ ВО ВРЕМЯ ИХ СВОБОДНОГО ВЫБЕГА

В статье представлен анализ известных методик, систем и приспособлений определения оценки качества неразборных шарикоподшипников по их виброхарактеристикам. Предложена методика оценки качества шарикоподшипников на созданной системе контроля СКП с бесконтактным приводом.

Ключевые слова: неразборный шарикоподшипник, виброускорение, виброскорость, выбег, бесконтактный привод.

A.U. Stelmakh, R.E. Kostyunik, V.A. Radziewsky, E.G. Kovalchuk, A.V. Stelmakh
METHODS OF ASSESSMENT OF QUALITY OF NON-COLLECTIVE BALL BEARINGS BY
VIBROCHARACTERISTICS DURING THEIR FREE RUN

The article presents an analysis of known techniques, systems and devices for determining the quality assessment of non-separable ball bearings by their vibration characteristics. A method for assessing the quality of ball bearings on the created control system of the SKP with a contactless drive is proposed.

Keywords: non-separable ball bearing, vibration acceleration, vibration velocity, run-out, contactless

Постановка проблеми. Сучасні авіаційні газотурбінні двигуни, механічні та автоматичні трансмісії, а також енергосилові установки (ЕСУ), у тому числі високофорсовані дизельні двигуни та інші машини і механізми, з точки зору механіки представляють собою сукупність вузлів тертя (трибосистем), від функціональної якості кожної залежить надійність, довговічність, безпека транспортних засобів (чи виробів) у цілому. Серед розмаїття трибосистем роторних машин та механізмів найбільш відповідальними та уразливими є шарикопідшипники, що реалізують просторову фіксацію обертових роторів та сприймають основну частину статичних і динамічних зусиль, що виникають у механізмі. Тому технічний стан шарикопідшипників та методи їх оцінки за віброхарактеристиками є найважливішою складовою, що визначає працездатність механізму у цілому.

Сучасний літак являє собою сукупність різноманітних вузлів тертя (трибосистем), від працездатності кожного з котрих залежить безпека польотів у цілому. Технічна безпека польотів полягає у сукупній працездатності, надійності та функціональній якості газотурбінних двигунів (ГТД), трансмісій, агрегатів управління літаками на всіх режимах експлуатації. *та ґрунтується на трибологічній якості кожного трибоконтракту.*

За видом тертя всі вузли тертя в залежності від геометрії контакту та кінематики руху поділяють на дві основні групи: ковзання або кочення. У кожному ГТД використовується достатньо велика кількість нерозбірних шарикопідшипників відповідних типорозмірів, кожний з яких працює при певних умовах змащування, навантаження, температури та інших факторів на різних режимах у процесі експлуатації та реалізує контакти тіл кочення з кільцями та сепараторами.

Відомі світові бренди підшипникової промисловості FAG, SKF, CRAFT, Timken а також спеціалізовані компанії ТОВ «ДИАМЕХ», ВАТ ВНИПП, ООО НПЦ «ТИК», НПЦ «Динамика», НПФ «Виброцентр» розробляють стенди з методиками для оцінки якості різноманітних підшипників кочення. Накопичені бази даних та розроблене програмне забезпечення цих виробників свідчать про високий рівень визначення властивостей шарикопідшипників у динаміці, що може забезпечувати їх якісний вихідний контроль на виробництві та вхідний контроль на підприємствах-споживачах шарикопідшипників. В основу вібродіагностичного контролю

шарикопідшипників покладено відповідні стандарти та керуючі документи (РД), де рекомендуються методики та умови випробувань (осьове, радіальне навантаження і швидкість обертання внутрішніх кілець) на відповідному обладнанні визначення вібропараметрів на певних режимах випробувань.

Власний досвід роботи на деяких з вищенаведених системах дозволив виявити низку недоліків та проблем вібродіагностування шарикопідшипників:

- відомі методики не враховують мікро- та нанозабруднення, що мають феромагнітну природу та утримуються локальними високоградієнтними магнітними полями на границях доменів феромагнітних деталей підшипників. Вважають, що всі підшипники після ультразвукового очищення знаходяться в однаковому чистому стані [1-4], що на нашу думку не відповідає дійсності;

- вертикальне положення підшипників не забезпечує перекочування тіл по всім робочим поверхням кілець, так як контакт між кільцями реалізується лише у верхньому секторі підшипника, а сепаратор під дією власної ваги провисає та здійснює нерівномірний розподіл відстані між тілами кочення;

- традиційний на відомих стендах привод внутрішнього кільця шарикопідшипників здійснюється у безпосередньому контакті з підшипниками ступиці обертового валу чи шпинделю, підшипниками двигуна, часто через ремінні передачі, що можуть стати джерелом неконтрольованого випадкового вібраційного збурення, що збільшує невизначеність узагальненого вібросигналу під час випробувань.

Таким чином, пошук альтернативних методів та засобів оцінки функціональної якості нерозбірних шарикопідшипників є актуальною задачею, котру слід вирішувати шляхом усунення виявлених завад, новими методичними та конструкторськими рішеннями і не лише для авіаційного приладо- та двигунобудування, але й для всієї машинобудівної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних трибологів показав, що відомі методики вібродіагностики нерозбірних шарикопідшипників не враховують мікро- та нанозабруднення, котрі мають феромагнітну природу та утримуються локальними високо-градієнтними магнітними полями на границях доменів їх феромагнітних деталей.

Вертикальне положення підшипників не забезпечує перекочування тіл по всім робочим поверхням кілець, так як контакт між кільцями реалізується лише у верхньому секторі підшипника, а сепаратор під дією власної ваги провисає та здійснює нерівномірний розподіл відстані між тілами кочення.

На відомих випробувальних стендах привід внутрішнього кільця шарикопідшипників здійснюється у безпосередньому контакті з підшипниками ступиці обертового валу чи шпинделю, підшипниками двигуна, часто через ремінні передачі, що можуть стати джерелом неконтрольованого випадкового вібраційного збурення, котре збільшує невизначеність узагальненого вібросигналу під час випробувань.

В ході багаторічної співпраці авторів даної статті з провідними підприємствами авіаційного двигунобудування України ДП «ЗМКБ ІВЧЕНКО-ПРОГРЕСС», ВАТ «МОТОР СІЧ» (Запоріжжя), ДП «АВІАКОН» (Конотоп), та ДП «МОТОР» (Луцьк), а саме під час впровадження стенду безконтактного очищення нерозбірних шарикопідшипників ОПШ [5] виявилось, що особливу складність викликає виявлення утворення дефектів на ранніх стадіях, в процесі їх розвитку та при проведенні вхідного контролю. Шарикопідшипники, що поставляються від заводів-виробників, для подальшого складання ГТД приймаються під гарантії постачальників. Зважаючи на сучасні реалії ринку комплектуючих, коли нерідко недобросовісні компанії пропонують відверто контрафактну продукцію при наявних маркуваннях та фальшивих документах, питання вхідного контролю якості шарикопідшипників (особливо для авіаційної техніки) постає надзвичайно актуальним.

Постановка завдань. Розробити методику оцінки якості нерозбірних шарикопідшипників за їх віброхарактеристиками, котра повинна враховувати виявлені завади за допомогою запропонованих нових підходів та конструкторських рішень.

Викладення основного матеріалу. В лабораторії нанотриботехнологій НДЧ НАУ розроблена система контролю якості нерозбірних шарикопідшипників СКП (рис.1). Шарикопідшипник встановлюється внутрішнім кільцем на нерухому вісь, а на зовнішній діаметр встановлюється навантажувальний диск масою 2000 ± 5 г. Випробувальний модуль живиться та управляється електронним модулем управління. Пристрій містить переналагоджувану оснастку

(ложементи і навантажувальні диски) з встановленим в ній випробовуваним підшипником, датчик для вимірювання навантажувальних режимів роботи, датчик для зняття діагностичної інформації – вібраційних характеристик параметрів підшипника.



Рис. 1. Система контролю якості нерозбірних шарикопідшипників СКП

На відміну від відомих пристроїв, у розробленому реалізовано безконтактний електромагнітний привод та безконтактний модуль осьового навантаження. Такі виконуючі пристрої не мають прямого металевого контакту, що запобігає передачі додаткових вібрацій і шумів на підшипник. У складі модуля вимірювання є платформа для позиціонування досліджуваного шарикопідшипника у вигляді грибка з гумовим амортизатором, що запобігає передачі вібрації під час обертання шарикопідшипника до захисного блока та станини, за рахунок чого усунуто вплив зовнішніх і внутрішніх перешкод.

На вимірювальній платформі встановлено такі чуттєві елементи (приймачі-перетворювачі), що дозволяють системі контролю СКП одночасно контролювати, записувати та зберігати поточні параметри шумів та вібрацій дослідного шарикопідшипника у трьох XYZ осях: акселерометр; п'єзодатчик; датчик вібрації ДМ 14; МЕМС мікрофон.

Після включення модуля управління завдяки індуктору навантажувальний диск починає обертатись до обертів, що перевищують необхідну частоту обертання зовнішнього кільця шарикопідшипника, характерну даному типорозміру, після чого вимикаються індуктори та навантажувальний диск самовільно обертається до повної зупинки. Час самовільного вибігу шарикопідшипників реєструється таймером. Паралельно виконується збір даних віброхарактеристик шарикопідшипника.

Методика обробки даних. Для оцінки якості нерозбірного шарикопідшипника за допомогою його безконтактного обертання і безконтактного навантаження були проведені випробування за методикою, що характеризує залежність часу вибігу від впливу мікро- та субмікрочасток забруднення мастильного матеріалу та самого діагностуючого об'єкту:

1. Перед випробуваннями шарикопідшипники осушувались з метою забезпечення однакового стану граничних шарів робочої рідини на їх поверхнях, як до, так і після їх очищення на стенді ОПШ.

2. Кожний підшипник позиціонувався (надписом вверху) на відповідному ложементі модельного пристрою безконтактного приводу вільного кільця шарикопідшипників з використанням нерухомих електричних джерел магнітного поля.

3. На зовнішнє кільце випробуваного підшипника встановлювався навантажувальний диск.

4. Стійка з електромагнітом системи навантаження встановлювалась так, щоб вісь його обертання співпадала з віссю обертання диска, а відстань між ними становила $20,0 \pm 0,5$ мм.

5. На безконтактний модуль осьового навантаження подавалось живлення та забезпечувалось навантаження (50 Н) випробуваного підшипника.

6. Інвертором N700E встановлювалась та реєструвалась максимальна частота обертання навантажувального диска. Для забезпечення відсутності біжучого магнітного поля вимикався інвертор N700E. Після цього навантажувальний диск продовжував обертатись за інерцією з плавним зменшенням швидкості обертання за рахунок тертя в контактах ковзання, тобто відбувався мимовільний вибіг підшипника до повної його зупинки.

6. Починаючи зі швидкості мимовільного обертання підшипника до 3000 ± 10 хв⁻¹ вмикався таймер, який розпочинав відлік часу до повної зупинки підшипника. Паралельно в ході

мимовільного зменшення частоти обертання підшипника з датчика знімались показники віброхарактеристик при досягненні швидкостей обертання, наведених у табл. 1.

7. У ході мимовільного вибігу кожного підшипника реєструвався час його вибігу.

Таблиця 1.

Результати випробувань нерозбірних шарикопідшипників при різних швидкостях їх обертання

№ підшипника	Частота обертання зовнішнього кільця підшипників, при яких визначались осцилограми віброприскорень, хв^{-1}				Максимальні оберти підшипника, хв^{-1}
207р МА 28011	200	800	2000	3000	(3770)
207р С 28011	100	800	2000	3000	(3740)
207р Г1 28011	140	1100	2000	3200	(3760)

На рис. 2-4 наведені порівняльні графіки залежності частоти обертів випробовуваних шарикопідшипників від часу їх самовільного обертання до повної зупинки.

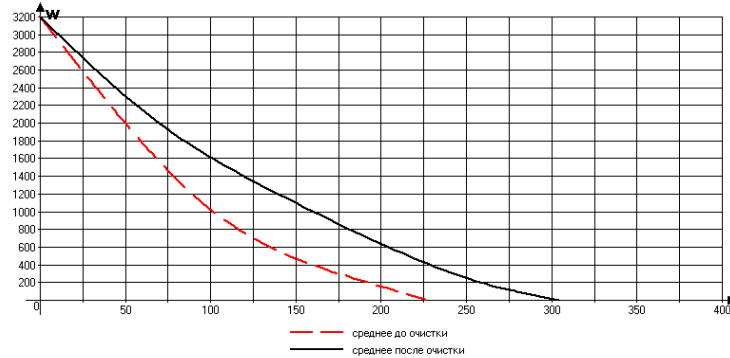


Рис.2. Порівняльні графіки залежності частоти обертів підшипника 26-207 р Г1 28011 від часу його самовільного обертання до повної зупинки

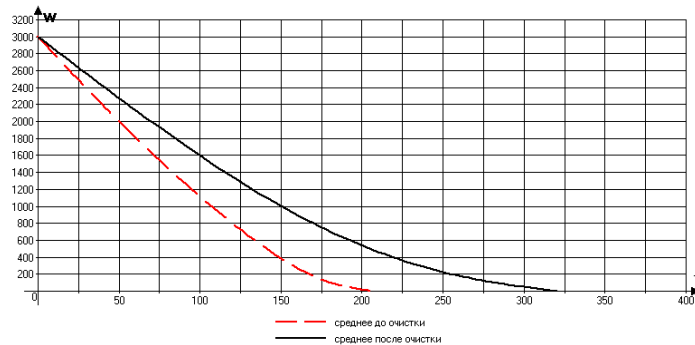


Рис.3. Порівняльні графіки залежності частоти обертів підшипника 26-207 р МА 28011 від часу його самовільного обертання до повної зупинки

Результати випробувань та дослідження за критерієм «час вибігу підшипника - 207» свідчать про наступне:

– застосування методу імпульсно-магнітно-турбулентного очищення на стенді ОПШ призводить до зменшення амплітуди сигналу віброприскорень при інших рівних умовах діагностування інерційного підшипника на 3...9%;

– після очищення підшипників на стенді ОПШ їх вибіг у всіх випадках збільшувався на 7...15% (в залежності від ступеню забрудненості).

Вихідні дані для подальшої обробки: час вибігу диску навантаження, після досягнення частоти обертання $2000 \pm 10 \text{ хв}^{-1}$ до його повної зупинки; порівняльні спектри віброприскорень на протязі всього часу вибігу (рис. 5).

Основними критеріями оцінки чистоти поверхонь та їх граничних змащувальних шарів у тракті кочення являються тривалість вибігу та відповідні миттєві віброприскорення, котрі в сукупності є персональною характеристикою даного підшипника.

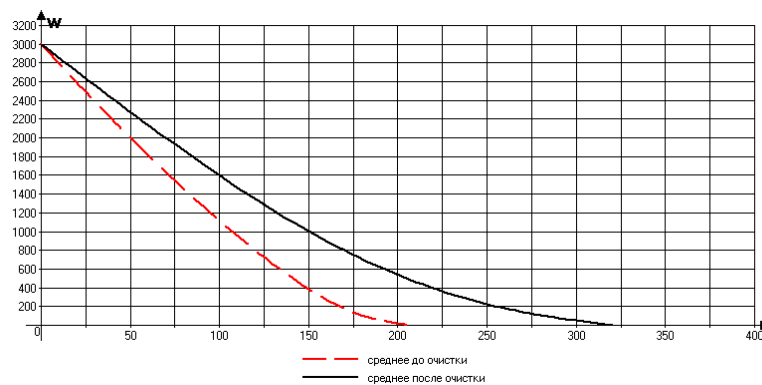


Рис.4. Порівняльні графіки залежності частоти обертів підшипника 26-207 р С 28011 від часу його самовільного обертання до повної зупинки

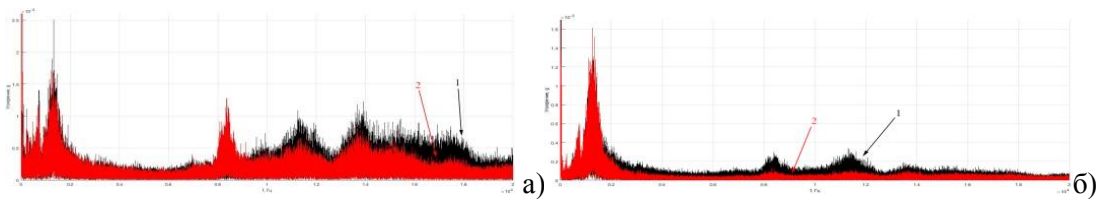


Рис.5. Порівняння спектрів віброприскорень до (а) та після (б) очищення шарикопідшипників при інших рівних умовах навантаження і частоти обертання

Аналіз спектрів віброприскорень показав, що після очищення підшипників на стенді ОПШ їх амплітудні піки зменшуються в різних частотних діапазонах.

Отримані результати випробувань та досліджень за критерієм час вибігу підшипника свідчать про збільшення часу їх вибігу після очищення на стенді ОПШ, що є одним з найбільш достовірних критеріїв ступеню забруднення робочих поверхонь.

Висновок. Випробування ефективності створеної методики оцінки якості нерозбірних шарикопідшипників на стенді СКП свідчать про адекватність, коректність та високу відтворюваність отриманих результатів за критеріями їх вільного вибігу та віброхарактеристик в ході очищення на стенді ОПШ. Невизначеність методу на системі СКП кожного з наступних параметрів не перевищує 7%.

Література

1. Барков А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам / А.В. Барков // Судостроение, № 3, 1985. – С. 21–23.
2. Диментберг Ф. М., Колесников К. С. Вибрации в технике. (Справочник), т. 31, 1980. – М.: Машиностроение. – 544 с.
3. Дорошко С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам / С.М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. –128 с.
4. ГОСТ Р 52545.1:2006 (ИСО 15242:2004). Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 1. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 13с.
5. Стельмах А. У. Физика процесса бесконтактной магнитно-турбулентной очистки подшипников качения /А. У. Стельмах, А.Б. Милосердов, Е.И. Мурашкин // Матеріали У Міжн. наук.-техніч. конф. «Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів», Київ, 6-10 жовтня 2014 р. – С.284-287.
6. Патент на винахід №108438 Україна, (51). МПК (2015.01) В08В 3/04 (2006.01), В08В 3/10(2006.01), В08В 3/12 (2006.01), С23G 5/00. Житницький О.Л., Стельмах О.У., Стельмах Д.О., Жітницька М.А. Спосіб безконтактного контрольованого очищення підшипників за допомогою електромагнітних індукторів та пристрій для його реалізації / заявл. 19.12.2013; опубл. 27.04.2015. - Бюл. № 8.