

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**БАДІР КАРІМ КАШАШ**



УДК 62.229.315.(045)

**ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ  
ФІНІШНОЇ МАГНІТНО-ТУРБУЛЕНТНОЇ ОЧИСТКИ**

05.02.08 – технологія машинобудування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

ЛУЦЬК – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Стельмах Олександр Устимович**,  
національний авіаційний університет,  
завідувач науково-дослідної лабораторії науково-  
дослідної частини НАУ

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Пилипець Михайло Ількович**  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя,  
завідувач кафедри технології машинобудування

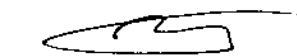
кандидат технічних наук, доцент,  
**Мороз Сергій Анатолійович**  
Луцький національний технічний університет,  
доцент кафедри електроніки та телекомунікацій

Захист відбудеться «3» грудня 2019 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради К 32.075.06 в Луцькому національному технічному університеті за  
адресою: 43000, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Луцького національного  
технічного університету за адресою: 43000, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

Автореферат розісланий «1» листопада 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Лапченко Ю.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ресурс і експлуатаційні характеристики трибосистем кочення та, як наслідок, працездатність машин і механізмів у цілому залежать від чистоти їх функціональних поверхонь. У результаті підвищення ефективності очищення відповідальних трибовузлів машин і змашувальних робочих рідин ресурс механізмів може бути збільшено в 2...3 рази, а у випадках з прецизійними вузлами – до 10 разів. Таким чином, забезпечення і контроль чистоти трибосистем кочення покращує їх експлуатаційні характеристики та збільшує ресурс, що на сьогодні є дуже актуально. Одним із способів збільшення ресурсу та покращення експлуатаційних характеристик підшипників кочення є ефективне видалення забруднень з робочих поверхонь, які з'являються під час виконання технологічних операцій механічного оброблення деталей підшипників, в процесі їх складання, а також під час зберігання та встановлення у підшипниковий вузол. Особливого значення такі забруднення набувають для спеціальних та прецизійних підшипників. Введення технологічної операції очищення підшипникових вузлів дає змогу запобігти передчасному їх зношуванню і скороченню витрат на обслуговування й ремонт. Літературний аналіз та результати власних досліджень показали, що віброакустичні параметри (віброшвидкість та віброприскорення), як основні параметри стану та якості трибосистем кочення, безпосередньо залежать окрім точності виготовлення і складання, також від ступеню чистоти робочих поверхонь та відсутності різного роду забруднень, зокрема металічних.

Для оцінки вібрації вимірюють та розраховують амплітудно-частотний спектр і загальний рівень вібрації. Розрахунок вібрації зводиться до визначення амплітуд і частот дискретних складових спектра. Оскільки дискретні складові містять інформацію про характер та рівень дефекту, то їх можна використовувати при вирішенні завдань забезпечення певного рівня вібрації підшипника й діагностувати його стан.

Основними джерелами збурень, що визначають вібрацію трибосистеми кочення, є технологічні похибки її виготовлення й складання та сторонні мікрочастки, що знаходяться на функціональних поверхнях.

Сьогодні для промислового видалення забруднень з робочих поверхонь деталей машин і механізмів використовуються наступні методи очищення: механічне, хімічне, комбіноване, ультразвукове, рідинне і газорідинне промивання. Однак всі вони мають певні недоліки та невелику ефективність, в першу чергу через складну конструкцію трибосистеми кочення у зібраному вигляді. На даний час майже відсутні глибокі дослідження, де задача очищення ставиться саме для підшипників. Це призводить до того, що при розробці нових шляхів досягнення промислової чистоти не враховуються конструктивні особливості підшипників кочення. Так, часто причиною недостатньої якості видалення забруднень є одновекторний характер дії активуючих і руйнуючих забруднення полів і сил, статичність та конструктивні особливості об'єкту очищення, що сприяє утворенню певних зон затінення елементів конструкції від дії засобу очищення робочих поверхонь.

Таким чином, проблема вискоєфективного очищення трибовузлів кочення, агрегатів та систем роторних машин загалом поки не отримала остаточного рішення й залишається **актуальною**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до договору Міністерства освіти і науки України з напрямку «Розробка найважливіших новітніх технологій науковими установами» і пов'язана з виконанням держбюджетних НДР: «Розробка безконтактного імпульсного магнітно-турбулентного методу зменшення загального рівня вібрації трибосистем» (№ державної реєстрації 0104U003739); «Розробка та створення дослідного зразка стенду та методики безконтактного магнітно-турбулентного очищення шарикопідшипників у зборі» (№ державної реєстрації 0114U001599); «Випробувально-вимірювальний комплекс вхідного контролю шарикопідшипників та методики визначення їх віброхарактеристик» (№ державної реєстрації 0116U004630).

**Мета і завдання дослідження.** Покращення експлуатаційних характеристик підшипників кочення шляхом використання технології фінішного видалення мікрозабруднень з поверхонь трибосистем кочення комбінованими магнітно-турбулентними полями.

**Завдання дослідження:**

1. Теоретично та експериментально обґрунтувати ефективність використання магнітних полів для очищення трибовузлів.

2. За допомогою теорії спектрального аналізу розробити стратегію визначення причин виникнення вібрацій в підшипникових вузлах.

3. Дослідити вплив параметрів імпульсно-магнітного поля на ефективність очищення трибосистем кочення.

4. Шляхом математичного моделювання розробити модель гідродинамічних процесів, що відбуваються під час очищення трибосистем кочення.

5. Розробити метод видалення феромагнітних забруднень з робочих поверхонь трибосистем кочення та пристрій для його практичної реалізації використовуючи джерело змінного імпульсно-магнітного поля.

6. Дослідити рівень покращення основних експлуатаційних показників трибосистем кочення після їх безконтактного очищення змінними імпульсно-магнітними полями.

7. Розробити інженерну методику проектування технологічних процесів фінішної магнітно-турбулентної очистки підшипників кочення та впровадити її в діюче виробництво.

**Об'єктом дослідження** є процеси утримання та видалення феромагнітних та інших забруднень з поверхонь підшипників кочення.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу параметрів імпульсно-магнітних полів і гідродинамічних потоків на ефективність очищення поверхонь тертя і підвищення експлуатаційних характеристик трибовузлів кочення.

**Методи дослідження:** лабораторні вимірювання віброакустичних характеристик трибосистем кочення; дослідження ефективності очищення

трибосистем кочення в залежності від параметрів джерела імпульсного магнітного поля; метод растрової електронної мікроскопії; метод рентгенівського енерго-дисперсійного аналізу; метод аналітичного зважування; метод статистичної обробки результатів; метод фізико-математичного моделювання. Для статистичної обробки даних та побудови графічних залежностей використано ПК.

**Наукова новизна роботи** полягає у виявленні закономірностей та механізму утримання на робочих поверхнях феромагнітних мікро- та наночасток під дією локальних міжзеренних магнітних полів, що природно виникають на межі доменів феромагнітних підшипникових сталевих поверхонь трибовузлів, що є домінуючим відносно дії молекулярних, кулонівських та гравітаційних сил.

**Для цього вперше:**

1. Сформульовано та експериментально обґрунтовано актуальність проблеми наявності мікрозабруднень різної природи на робочих поверхнях трибосистем кочення, що утворюються під час їх виробництва, складання, зберігання, розконсервації, встановлення у виробу та в процесі їх експлуатації. Запропоновано питання чистоти поверхонь трибосистем кочення виділити у самостійну науково-технічну проблему, що потребує особливих підходів через конструкційні особливості об'єктів очищення (велика кількість контактних каналів складного перерізу, вузьких щілин та затінених зон).

2. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що на рівень адгезії частинок забруднень з матеріалом об'єктів очищення впливають не тільки молекулярні, кулонівські, гравітаційні сили, сили поверхневого натягу, та ін., а й локальні міжзеренні магнітні поля, що завжди виникають на межі доменів феромагнітних поверхонь сталевих підшипникових деталей.

3. На основі отриманих результатів мікрорентгеноспектрального, фазового і гранулометричного аналізів видалених часток забруднень виконана оцінка їх фізико-хімічного складу і розкрито механізм їх утримання магнітними полями на поверхнях деталей трибосистем кочення.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що шляхом дії на об'єкт очищення змінними імпульсними полями магнітної природи стає можливим подолання локальних коерцитивних сил, котрими утримуються феромагнітні частинки на межі доменів, та можливість видалення їх з поверхонь, що очищуються.

5. Запропоновано математичний алгоритм механічного руху частинок забруднень в затіненій області на основі моделі взаємодії часток з робочою поверхнею, що отримало підтвердження на розроблених приладах та стендах з джерелами змінних імпульсних магнітних полів.

**Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблено та створено стенд для віброакустичної оцінки якості трибосистем кочення, до складу якого входять: комплекс оцінки якості трибовузлів кочення, пристрій прикатування та вимірювач моменту тертя ВМТ-1, який дозволяє швидко і ефективно провести дослідження за критерієм загального рівня вібрації (ЗРВ).

Спираючись на висунуті теоретичні положення створено установку для видалення мікро- та субмікрочастинок феромагнітної та іншої природи з поверхонь різних за габаритами трибосистем кочення (із зовнішнім діаметром до 300 мм) на базі джерела змінного імпульсного магнітного поля і розроблена методика проведення очищення на ньому.

Апробація стенду спільно з фахівцями ДП «ЗМКБ «Івченко-Прогрес» показала високу ефективність розробленого і створеного способу та засобу на машинобудівних підприємствах України та світу. Спільно з фахівцями наукового центру International Advanced Research Centre for Powder Metallurgy & New Materials (ARCI, Індія) було підтверджено високу ефективність даного методу при очищенні нових підшипників фірми SKF, які були попередньо промиті виробником та герметично запаковані.

Проведені спільно з фахівцями ВАТ «Укртатнафта» дослідження трибосистем кочення, що використовуються на обладнанні нафтопереробної промисловості, підтвердили високу ефективність розроблених стенду безконтактного імпульсного магнітно-турбулентного очищення та методу віброакустичної оцінки якості трибосистем кочення.

Розроблений та створений спосіб та пристрій використовуються на ДП «ЗМКБ «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя) для промислового очищення авіаційних підшипників кочення та в лабораторії нанотриботехнологій НДЧ НАУ для проведення наукових досліджень.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані дисертантом самостійно. Особистий внесок дисертанта в роботах, виконаних одноосібно [7, 10] та у співавторстві [1-6, 8, 9, 11-30], полягає: в обґрунтуванні наукового напрямку [1, 9, 13, 18]; формуванні мети роботи та розроблені методик експериментальних досліджень [4, 5, 14-17]; участі в постановці й проведенні експериментальних досліджень [2, 3, 21]; розробленні математичних моделей [10]; дослідженні зв'язків динамічних процесів у граничних шарах змащувального середовища з оптичними властивостями каналу для знімання інформації [6, 7, 8, 11, 24-26]; формулюванні наукової новизни й основних висновків за результатами роботи [20, 27]; аналізі та узагальненні отриманих результатів дослідження [12, 19, 22, 23]; дослідженні технологічних особливостей нагнітання і/або створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/газоподібному/високодисперсному, твердому або багатофазовому стані [28-30].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались й обговорювались на наукових конференціях та семінарах, зокрема: III та IV міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми хімотології» (м. Київ, 2010 р., м. Одеса, 2012 р.); XI Міжнародному науково-технічному семінарі «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (м. Свалява, 2011 р.); X та XII міжнародних науково-технічних конференціях «АВІА» (м. Київ, 2011 р., 2013 р.); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Инженерия поверхности и реновация изделий» (м. Ялта, 2011 р.); XII Міжнародному науково-технічному

семінарі «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (м. Свалява, 2012 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Литьє-2012» (м. Запоріжжя, 2012 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів» (м. Київ, 2014 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування» (м. Луцьк, 2019 р.).

**Публікації.** Основний зміст і результати дисертаційного дослідження опубліковані в 30 друкованих працях, 10 з них надруковано у фахових виданнях, що входять до переліку ДАК Міністерства освіти і науки України, 1 у міжнародному науковому виданні, що входить до науково-метричної бази Scopus; 14 – у тезах науково-технічних конференцій та семінарів, 6 патентів України на корисні моделі та винаходи.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 125 найменувань та 6 додатків. Повний обсяг дисертації складає 135 сторінок. З них – 122 сторінки основного тексту, 71 рисунок, 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, викладена наукова новизна результатів досліджень, показано їх практичне значення, надані відомості про апробацію та публікацію основних положень роботи.

**У першому розділі** на підставі аналізу досліджень вчених: П.Н. Белянiна, Г.А. Нікітiна, М. Ітiкава, А.С. Ахматова, I.В. Крагельського, М.Н. Добичiна, В.С. Комбалова, С. Тiкадзумi, В.Ф. Матюка, М.І. Каганова, Ю.М. Стародубцева та iн. встановлено, що основні експлуатаційні характеристики трибосистем кочення залежать від якості виготовлення і збирання їх складових елементів (кілець, тіл кочення, сепараторів). Точність та якість трибосистеми кочення визначається точністю виготовлення деталей та складання підшипників, що визначає величини радіального й осьового биття кілець, а також радіальні й осьові зазори зібраного підшипника. Точність вузла в цілому залежить від обробки посадочних місць на валу й у корпусі, монтажу й регулювання зазорів.

Вібрація підшипників безпосередньо впливає на їх довговічність, точність, та роботу механічних систем в цілому. Вібрація, як коливальний процес, може бути охарактеризована амплітудою, частотою й фазою віброзміщення, віброшвидкості та віброприскорення. Для оцінки вібрації розраховують та вимірюють амплітудно-частотний спектр і загальний рівень вібрації.

Основними джерелами збурень, що визначають вібрацію трибосистеми кочення, є технологічні похибки її виготовлення й складання, сторонні предмети, що знаходяться на робочих поверхнях. Ударні сили, що при цьому виникають, залежать від зазорів, невірноваженості рухомих елементів, наявності сторонніх предметів (у тому числі, забруднень) на робочих поверхнях

і в змащувальних середовищах та робочих рідинах, а також від зовнішніх чинників.

Технологічні дефекти й наявність забруднення на робочих поверхнях, в мастильному та робочому середовищі обумовлюють перерозподіл деформації, що призводить до появи збуджуючих вібрацій сил. Деформація залежить від статичних зміщень під дією навантаження, а також від відхилення форми доріжок кочення кілець та різнорозмірності тіл кочення підшипника.

При обертанні внутрішнього кільця підшипника можливі наступні режими руху:

а) обкатування внутрішнього кільця і тіл кочення з кутовою швидкістю  $\omega_c$ ;

б) кочення, при якому результуючий вектор радіального навантаження на підшипник  $R$  змінюється по напрямку на невеликий кут; якщо при цьому число тіл кочення, що сприймають навантаження не менше двох, то переміщення внутрішнього кільця і кут  $\varphi$  змінюються відповідно зі зміною величини і напрямку вектора  $R$ ;

в) перевертання, при якому для деяких моментів часу навантаження сприймається одним тілом кочення.

Найбільш ефективним та інформативним методом дослідження стану та якості трибосистем кочення є віброакустичний, оскільки він дозволяє діагностувати практично всі види дефектів виготовлення й експлуатації.

Спираючись на проведеній літературний аналіз зроблено висновок, що проблема видалення забруднень з трибосистем кочення на сьогодні є актуальною, оскільки питанню забезпечення промислової чистоти машин і механізмів не приділялося належної уваги. Це призводило до недостатньо повного розуміння механізму очищення трибосистем і не дозволяло досягнути необхідної якості під час застосування відомих методів.

На основі проведеного аналізу літературних джерел визначені мета та задачі дослідження.

**У другому розділі** проведено аналіз способів визначення стану опор кочення шляхом аналізу їх частотного спектру. Встановлено, що для діагностування підшипників використовують параметри, які характеризують стан як окремого підшипника, так і всіх підшипникових опор у виробі.

Дефекти підшипників впливають на величину і характер зміни моменту тертя. У результаті статистичної обробки експериментальних даних отримані співвідношення, що дозволяють проводити дефектоскопічний аналіз трибосистем кочення, але цей метод має ряд недоліків: для встановлення кореляційного зв'язку необхідно проводити великі статистичні дослідження, виконується тільки якісна діагностика (кількісні характеристики дефектів визначити неможливо). Тому застосовувався спектральний аналіз функціонування трибосистем кочення з метою визначення типу та рівня забрудненості. Вібрація й шум у підшипниках, які мають дефекти та забруднення на внутрішніх кільцях, у кількісному відношенні проявляються більшою мірою, ніж при наявності тих же дефектів на зовнішніх кільцях. Це



пояснюється тим, що кільце яке обертається створює полігармонічну вібрацію, на відміну від моногармонічної вібрації стаціонарного кільця.

Збільшення амплітуди нерівностей (що характерно для забруднень робочих поверхонь підшипника) на доріжках кочення кілець зростає не тільки рівень власної вібрації й шуму підшипників, але й змінюються їхні амплітудно-частотні характеристики. Таким чином, амплітуди, наприклад, частот 1,0; 2,2; 3,8 кГц у спектрах вібрації й шуму (рис. 1) різко зростають.

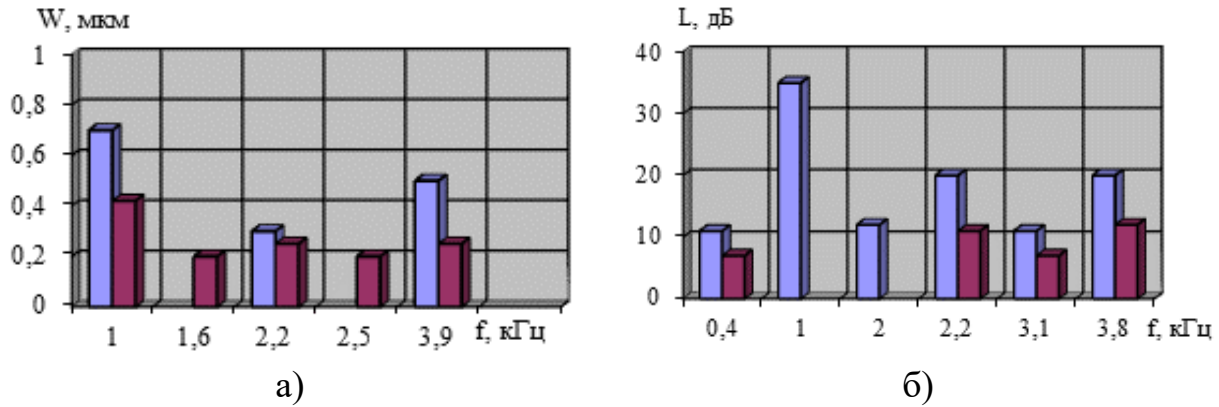


Рис. 1. Вплив овальності доріжок кочення зовнішніх кілець підшипника 6023 при значеннях нерівностей при ■ –  $r_{10} = 0,2$  мкм і ■ –  $r_{10} = 2$  мкм: а – на спектр вібрації; б – на спектр шуму

Геометричні аномалії на доріжках кочення кілець підшипників впливають на сили, що діють із боку тіл кочення на сепаратор. Так, у підшипниках при відсутності дефектів сила, що діє з боку кульки на сепаратор, становить 0,03...0,05 Н, а при наявності хвилястості кілець вона збільшується в 15...20 разів. Для мінімізації власної вібрації й шуму в кулькопідшипниках радіальний зазор не повинен перевищувати 10 мкм. При такій точності виготовлення навіть незначне забруднення робочих поверхонь суттєво погіршує експлуатаційні властивості.

Збільшення кількості тіл кочення приводить до зменшення амплітуд змінних складових жорсткості й навантажень. При цьому спектр збурень прямує в більш високочастотну область і залежно від розташування частот збурень відносно резонансних частот може покращувати або погіршувати віброакустичні характеристики підшипників (рис. 2).

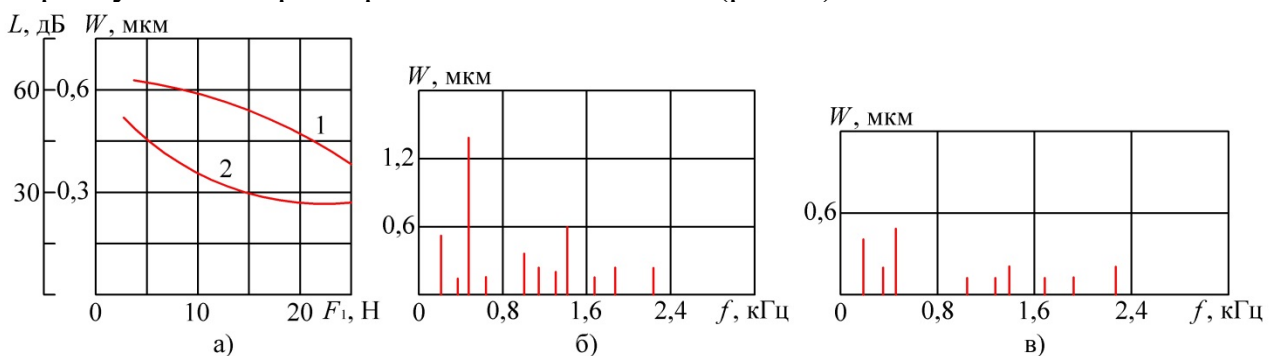


Рис. 2. Вплив осевого навантаження: а – на рівень вібрації (крива 1) і шуму (крива 2); б, в – на спектри вібрації при навантаженні  $A = 2; 25$  Н відповідно

Радіальне й осьове навантаження по-різному впливають на віброакустичні характеристики: зі збільшенням осьового навантаження (при постійному радіальному) власна вібрація й шум підшипників зменшуються (рис. 2а), зі збільшенням радіального (при постійному – осьовому) – збільшуються (рис. 3а).

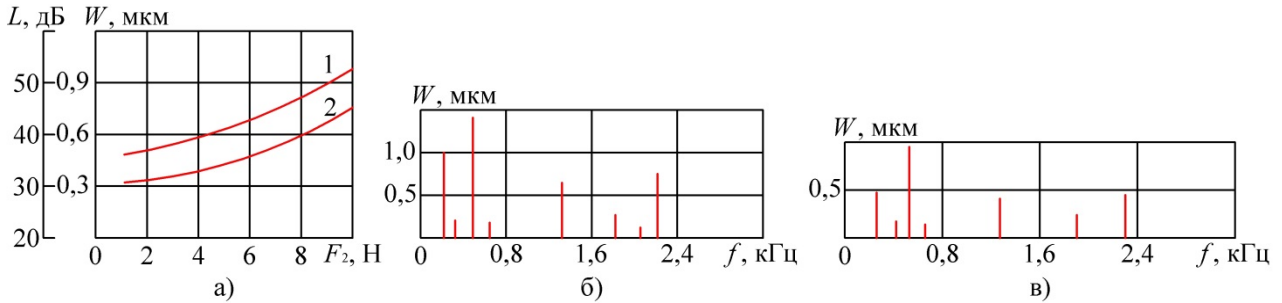


Рис. 3. Вплив радіального навантаження: а – на рівні вібрації (крива 1) і шуму (крива 2); б, в – спектри вібрації при  $R = 2; 10$  Н відповідно

Такий характер зміни вібраційних параметрів пояснюється тим, що при збільшенні осьового навантаження в контакті з кільцями перебуває більше число тіл кочення.

Технологічні похибки та забруднення доріжок менш впливають на віброакустичні характеристики. Зростання рівня вібрації й шуму, а також амплітуд у спектрах для різних частот різне. Наприклад, амплітуди частот 20, 400, 1200, 2200 Гц (рис. 2б, в; рис. 3б, в) при зміні радіального навантаження зростають менше, ніж амплітуди тих же частот при збільшенні осьового навантаження. Таким чином, зменшення вібрації, як основного показника якості та стану підшипників, може бути досягнуте шляхом підвищення якості виготовлення, збільшення числа тіл кочення, а також максимально повним видаленням забруднень з робочих поверхонь та із паливно-мастильних матеріалів.

Результати досліджень ступеню очищенню трибосистем кочення в зборі створили передумови для розроблення лабораторного стенду оцінки віброакустичних характеристик, який дає змогу оперативно та ефективно визначати стан об'єктів дослідження.

**У третьому розділі** для дослідження процесів, що відбуваються під час видалення механічних забруднень з поверхонь підшипників кочення, та з метою розробки ефективних методів і засобів очищення побудовано фізико-математичну модель, в якій розглянуто вплив складових сил, що виникають під час видалення забруднень з трибосистем кочення змінним імпульсним магнітно-турбулентним методом.

Математична модель побудована з використанням наступних припущень:

1. Частинка забруднення має сферичну форму;
2. Поверхня зовнішнього кільця підшипника – ідеально циліндрична.
3. Сила зчеплення частинки забруднення з поверхнею підшипника не залежить від напрямку зміщення забруднення і спрямована протилежно до вектора зміщення;

4. Взаємодія частинки забруднення з підшипником та рідиною з достатньою точністю описується законами класичної механіки та гідравліки.

Розглянемо сили, що діють на забруднення сферичної форми, яке знаходиться на поверхнях кільця підшипника (рис. 4). Кільце підшипника обертається в муючій рідині.

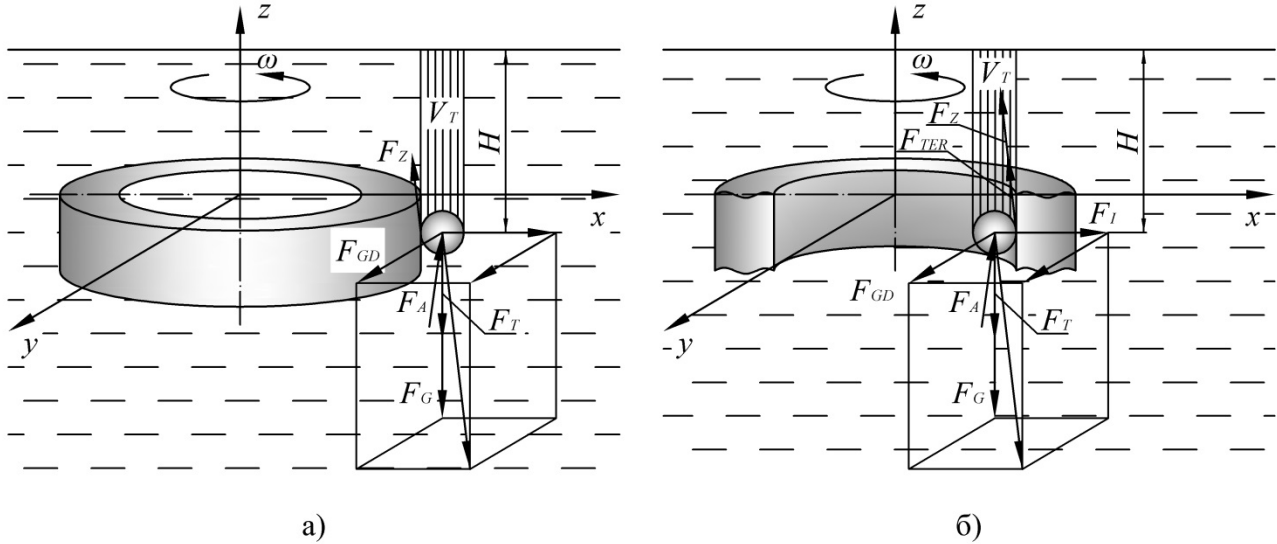


Рис. 4. Сили, що діють на забруднення сферичної форми: а – на зовнішній поверхні кільця підшипника; б – на внутрішній поверхні кільця підшипника

#### 1. Сила тяжіння

$$F_T = mg, \quad (1)$$

де  $m$  – маса частинки забруднення, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

2. Сила зчеплення частинки забруднення з матеріалом кільця підшипника  $F_Z$ .

3. Сила Архімеда, що виштовхує частинку забруднення з середовища, в якому вона знаходиться (очищувальної рідини):

$$F_A = \rho g V, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питома маса (густина) рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – об'єм частинки забруднення,  $\text{м}^3$ .

Згідно прийнятого припущення, частинка має сферичну форму, тобто:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3, \quad (3)$$

де  $r$  – радіус частинки.

Тоді, з урахуванням (3), вираз (2) для визначення сили Архімеда набув вигляду:

$$F_A = \frac{4}{3} \rho g \pi r^3. \quad (4)$$

Суттєвий вплив сили Архімеда є за умови, що питома маса матеріалу забруднення менша за питому масу рідини або одного порядку з нею. Якщо

$\rho_z > \rho$  ( $\rho_z$  – питома маса забруднення кг/м<sup>3</sup>), то сила Архімеда не чинить суттєвого впливу на видалення забруднення, тому її можна не враховувати.

4. Вертикальна складова сили тиску, що сприяє осадженню забруднення:

$$F_G = \rho g V_T, \quad (5)$$

де  $V_T$  об'єм тіла тиску, що обмежене вільною поверхнею рідини, поверхнею забруднення та вертикальною циліндричною поверхнею, що проходить по контуру поверхні забруднення.

З геометричних міркувань:

$$V_T = \pi r^2 H - \frac{2}{3} \pi r^3 = \pi r^2 \left( H - \frac{2}{3} r \right), \quad (6)$$

де  $H$  – глибина занурення центра мас частинки забруднення під вільну поверхню рідини, м.

Формула (5) з врахуванням (6) має вигляд:

$$F_G = \rho g \pi r^2 \left( H - \frac{2}{3} r \right), \quad (7)$$

Величина вертикальної складової сили тиску прямо пропорційна глибині занурення центра мас частинки забруднення під вільну поверхню рідини. Горизонтальні складові сили тиску на частинку забруднення врівноважуються, тому їх не враховано. При цьому можливо два випадки:

а) частинка забруднення спливає на вільну поверхню рідини, якщо

$$F_A > F_T + F_G + F_Z. \quad (8)$$

Підставивши в формулу (8) вирази (1), (4), (7), отримаємо умову спливання забруднення на поверхню рідини за умови відсутності обертання підшипника:

$$F_Z < \rho g \pi r^2 (2r - H) - mg, \quad (9)$$

що можливе при умові  $m < \rho \pi r^2 (2r - H)$ .

б) частинка забруднення опускається на дно миючої камери з рідиною

$$F_A + F_Z < F_T + F_G. \quad (10)$$

Підставивши в формулу (10) вирази (1), (4), (7) отримано умову опускання забруднення на дно миючої камери з рідиною, за умови відсутності обертання підшипника:

$$F_Z < \rho g \pi r^2 (H - 2r) + mg, \quad (11)$$

Формула (11) є умовою гідростатичного осадження забруднення, аналіз якої свідчить, що можна підібрати таку глибину занурення  $H$ , за якої ця умова буде виконуватись, отже забруднення будуть видалятися.

5. Відцентрова сила інерції

$$F_I = m \omega^2 R, \quad (12)$$

де  $\omega = \pi n / 30$  – кутова швидкість обертання кільця підшипника, рад/с;  $n$  – частота обертання кільця підшипника, об/хв.,  $R$  – відстань від центру обертання до центра мас частинки забруднення.

Для забруднення, що знаходиться на зовнішній поверхні кільця підшипника, відцентрова сила сприяє видаленню забруднення, а для частинки,

що міститься на внутрішній поверхні кільця підшипника (рис. 4 б), навпаки, ускладнює видалення забруднення:

$$F_{TER} = k_0 F_I, \quad (13)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт тертя спокою, що залежить від матеріалу забруднення та матеріалу кільця підшипника.

Тоді формула (13) з врахуванням (12) матиме вигляд:

$$F_{TER} = \frac{k_0 \pi^2 m n^2 R}{900}, \quad (14)$$

Тому з підвищенням частоти обертання підшипника видалення забруднень з внутрішніх поверхонь кільця підшипника ускладнюється, що обмежує частоту обертання підшипника.

6. Сила опору руху частинки забруднення рідини, яка залежить від швидкості руху рідини і визначається:

– для ламінарного режиму за формулою Стокса:

$$F_{GD} = 6\pi\mu r\nu, \quad (15)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с;  $\nu$  – середня швидкість рідини. Для ламінарного режиму

$$\nu = u_{\max} / 2, \quad (16)$$

де  $u_{\max}$  – максимальна швидкість.

Внаслідок рідкокристалічної природи наявних граничних шарів, що безпосередньо розташовані на поверхні кільця підшипника, їх швидкість відносно рухомої поверхні, близька до нуля (рис. 5 а, б). Тому максимальна швидкість визначається як:

$$u_{\max} = \omega R_1 = \frac{\pi n R_1}{30}. \quad (17)$$

де  $R_1$  – відстань від центру обертання до точки контакту поверхні підшипника з забрудненням.

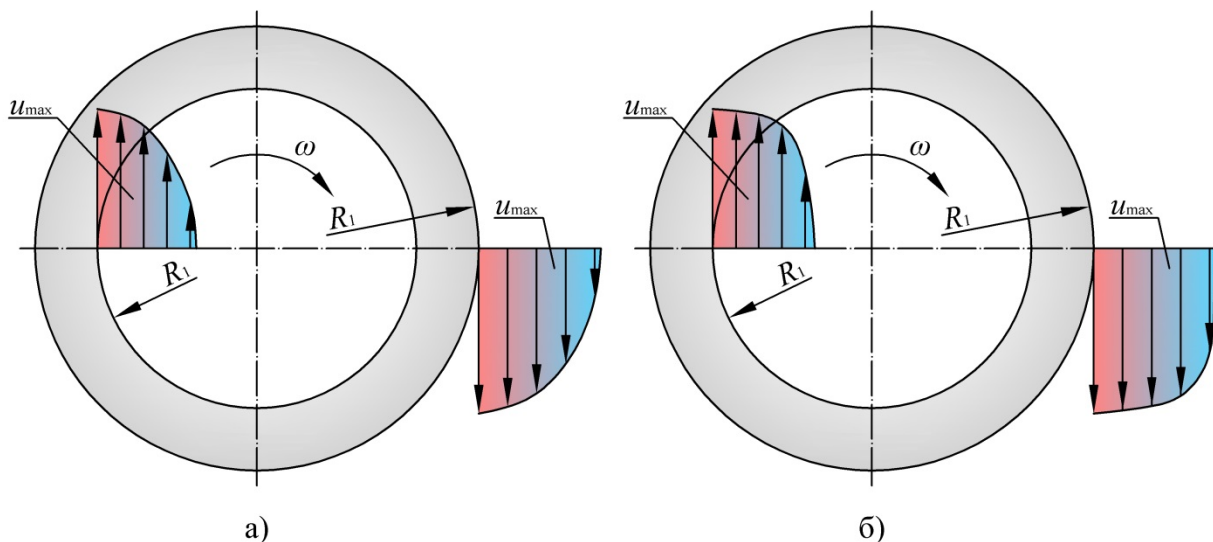


Рис. 5. Розподіл швидкостей в контактному шарі з поверхнею кільця підшипника: а – ламінарний рух; б – турбулентний рух

З урахуванням (16) та (17) формула Стокса (15) матиме вигляд:

$$F_{GD} = \frac{\pi^2 \mu r n R_1}{10}. \quad (18)$$

– для турбулентного режиму руху за законом Ньютона:

$$F_{GD} = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (19)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт лобового опору, що характеризує форму тіла;  $v$  – середня швидкість рідини.

Для турбулентного режиму  $v = u_{\max} / 1,15 \dots 1,3$ . Тому прийнемо, що:

$$v = u_{\max} / 1,2, \quad (20)$$

$S$  – площа проекції тіла на площину, що перпендикулярна до напрямку руху.

Для сферичної частинки забруднення:

$$S = \frac{\pi r^2}{4}. \quad (21)$$

З врахуванням (17), (20), (21) формула (19) набуде вигляду:

$$F_{GD} = C_x \frac{\pi^2 \rho n^2 R_1^2 r^2}{10368}. \quad (22)$$

Отже, для видалення забруднення під час обертання підшипника необхідно щоб виконувались гідродинамічні умови:

а) для частинки, що міститься на зовнішній поверхні кільця підшипника:

$$\sqrt{F_{GD}^2 + (F_T + F_G - F_A)^2} + F_I^2 > F_Z. \quad (23)$$

б) для частинки, що міститься на внутрішній поверхні кільця підшипника:

$$\sqrt{F_{GD}^2 + (F_T + F_G - F_A)^2} + F_I^2 - F_{TER} > F_Z. \quad (24)$$

Характер переміщення електромагнітного поля забезпечують періодичне розмагнічування матеріалу підшипника, коли сумарний вектор протікання струмів в матеріалі дорівнює нулю і сили магнітної взаємодії забруднення з деталями підшипника зникають. При цьому під дією інших складових сил взаємодії частки забруднення переходять у миючий розчин при виконанні гідродинамічних умов (23), (24).

Далі, коли з'являється зовнішнє магнітне поле (МП), на забруднення буде діяти сила взаємодії магнітних зарядів, а так як напруженість зовнішнього МП більша за напруженість поля на поверхні деталей підшипників, це буде сприяти видаленню забруднення в потік в напрямку додаткового зовнішнього імпульсного магнітного поля (ДЗІМП).

На основі отриманих результатів експериментальних даних, індукція МП на поверхні герметичної камери складає 140 мТл, зовнішнє кільце підшипника має залишкову намагніченість близько 10 мТл, внутрішнє кільце – 9 мТл, індукція МП підшипника на відстані 15 мм від дна камери – 100 мТл.

Встановлено, що максимальна робоча частота змінного імпульсного МП повинна бути не менше 1000 Гц. Експериментально встановлено, що при меншій частоті організація безконтактного обертання зовнішньої обойми

об'єкта очищення ускладнена, а перевищення частоти 5000 Гц викликає активний неконтрольований відтік миючої рідини від об'єкта очищення, що призводило до падіння ефективності видалення забруднень. Тому дослідження ступеня намагніченості проводились при цій та нижчих частотах (рис. 6).

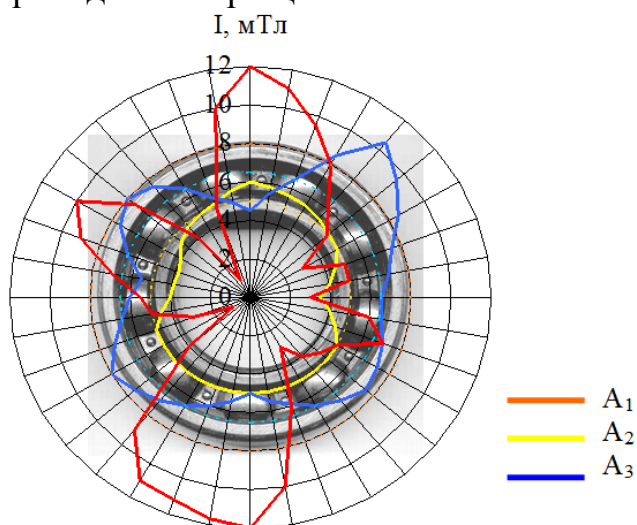


Рис. 6. Розподіл магнітної індукції  $I$  поверхонь деталей підшипника відносно радіусів зовнішнього ( $A_1$ ) і внутрішнього кілець ( $A_2$ ) і сепаратора з тілами кочення ( $A_3$ ) після очищення протягом 3 хвилин при частоті імпульсного МП 4800 Гц

У четвертому розділі на основі проведених досліджень визначено залежність кількості видалених часток забруднень від їх лінійного розміру. Найбільша кількість зафіксованих на робочих елементах фільтрів забруднення мали розмір до 5 мкм, тоді як більші за 50 мкм спостерігалися значно рідше. Особливо багато було зафіксовано найбільш дрібних часток, котрі мали середній лінійний розмір менший за 1 мкм, що наведено на графіку (рис. 7).

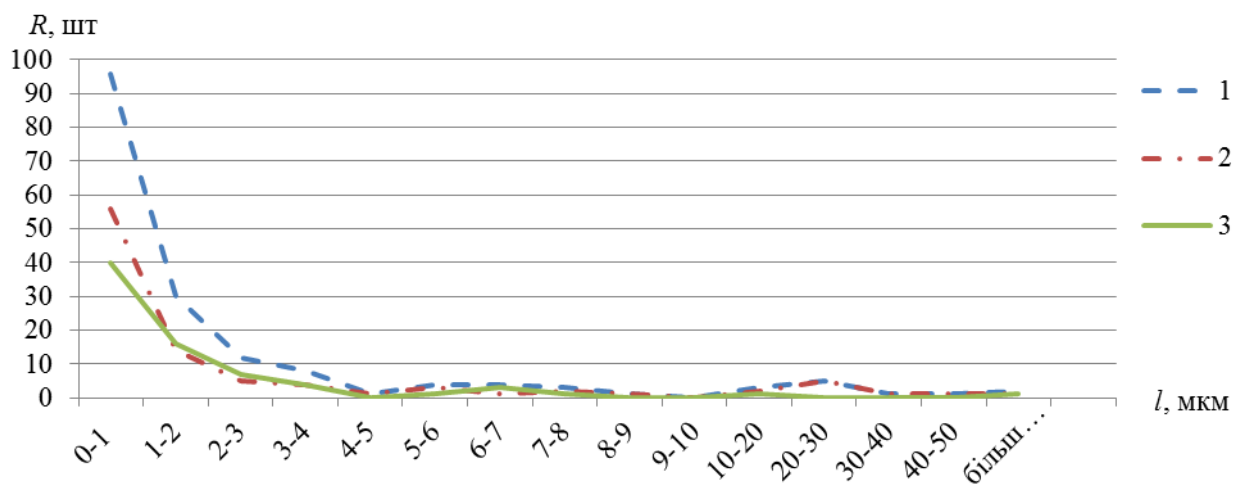


Рис. 7. Графіки залежності кількості зафіксованих на фільтруючому елементі забруднень  $R$  від їх природи та середнього лінійного розміру  $l$ : 1 – загальна кількість видалених забруднень; 2 – забруднення феромагнітної природи; 3 – забруднення неферомагнітної природи

Дослідження хімічного складу виявили, що більша частина забруднень – це металеві феромагнітні фрагменти (мікростружка) (рис. 8).

Багато металічних фрагментів мали велику відносну довжину, що пояснюється особливостями їх магнітної взаємодії. Серед цієї групи мають місце такі, чий склад співпадає зі складом матеріалів, з яких виготовлені елементи конструкції (сталь ШХ15 – тіла кочення та кільця, бронза або латунь – сепаратори), і такі, що не пов'язані з конструкцією досліджуваних трибосистем.

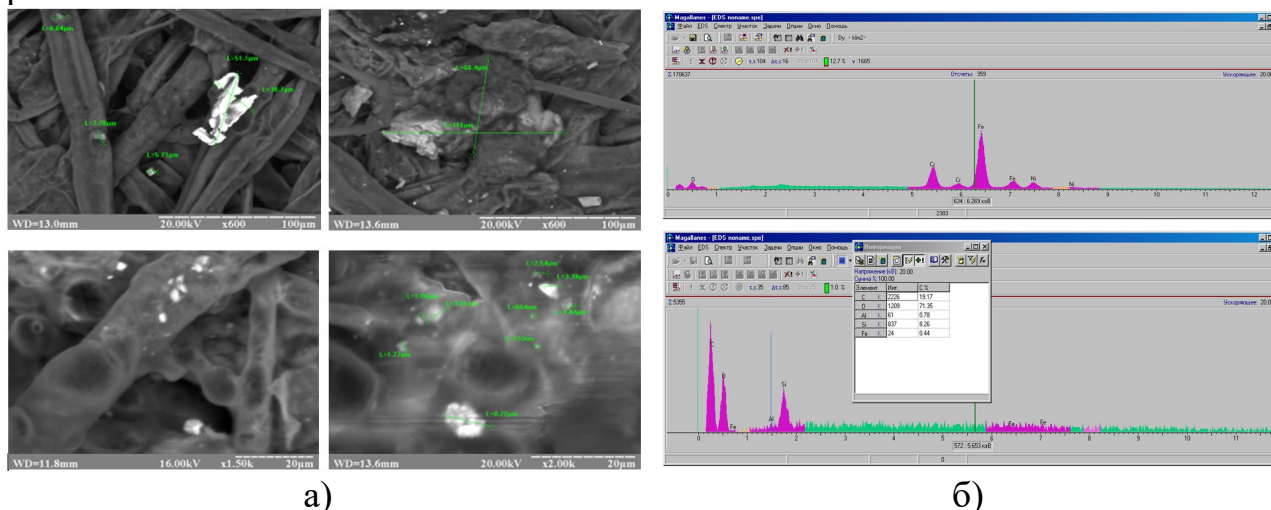


Рис. 8. Зразки забруднень видалені з підшипників, після розконсервування (а) та спектри хімічного складу видалених забруднень (б)

Розроблено стенд очищення трибосистем кочення із застосуванням технології магнітно-турбулентного видалення забруднень з підшипників кочення, що базується на використанні комплексної дії на об'єкт очищення сил поверхневого тяжіння, гідродинамічних сил та змінного магнітного поля. Імпульсне змінне магнітне поле виконує функцію, як і поверхнево-активні речовини, активації та розпушуванню плівки, а також сприяє видаленню металевих часток забруднень (феромагнітних та неферомагнітних за рахунок виникнення в них струмів Фуко).

Ефективність модулів промивки і фільтрації досягається за рахунок утворення турбулентної течії миючої рідини, що робить можливим відрив частинок забруднення різної природи.

З метою підтвердження результатів теоретичних досліджень проведено комплекс випробувань партії підшипників серії 208 із застосуванням вимірювача вібрацій «КОМПАКС-РПП». Всі об'єкти дослідження пройшли очищення на макеті стенду імпульсного магнітно-турбулентного очищення. Оцінка рівня вібрацій підшипників на цьому комплексі по віброприскоренням та віброшвидкостям виконувалась у діапазоні 22...11200 Гц.

Проводилися порівняльні випробування у вказаних смугах частот і виконувалась оцінка загального рівня вібрації в діапазоні 22...11200 Гц (рис 9).

Результати віброакустичної оцінки трибосистем кочення, які пройшли усі стадії промислового очищення (у тому числі і ультразвукове), розробленим імпульсним магнітно-турбулентним методом свідчать про суттєве підвищення



(особливо у спектрі високих частот) якості трибовузлів за критеріями загального рівня вібрацій. Після очищення всіх підшипників загальний рівень їх вібрацій зменшувався на 5...11%.

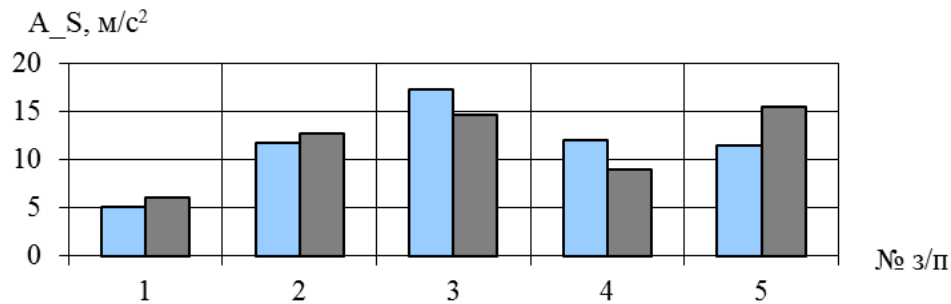


Рис. 9. Порівняльна гістограма віброприскорення  $A_S$  п в смузі частот 22...11200 Гц у відповідності з актами вібродіагностики:

■ – результати випробувань підшипників до очищення;

■ – результати випробувань після очищення на лабораторному макеті стенда імпульсного магнітно-турбулентного очищення трибосистем кочення

В п'ятому розділі наведені результати розроблення лабораторного стенду та методики для оцінки віброакустичних характеристик підшипників кочення, котрі реалізовані із використанням конструктивних рішень науково-дослідної лабораторії науково-дослідної частини НАУ.

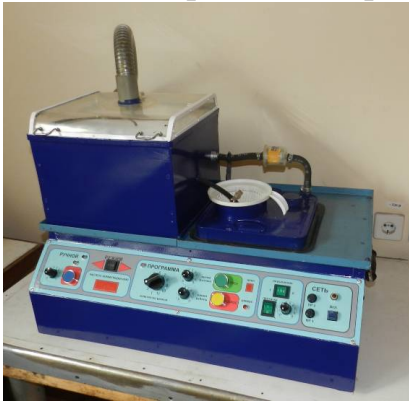
Для оцінки вібраційних характеристик частота, з якою відбувається обертання підшипника, становить  $1500 \pm 1\%$  об/хв. Стабільність частоти досягається використанням системи зворотного зв'язку двигуна і оптичного тахометра. В якості датчика обрано вібропереретворювач п'єзоелектричного типу, що характеризується малою чутливістю до зовнішніх умов. Комплекс дозволяє виконувати оцінку віброшвидкості, віброприскорення і моменту тертя в трибосистемах кочення. Комплект навантажувальних дисків і оправок дозволяють суттєво розширити номенклатуру досліджуваних підшипників.

В результаті очищення досягнуто зменшення моменту тертя в середньому на  $0,05$  Н·м та загального рівня вібрації більш ніж на 3 дБ. На окремих зразках мало місце підвищення цих показників після очищення, що, викликано проявом виробничих дефектів після видалення забруднень, які могли їх демпфувати під час діагностування.

З метою збільшення ресурсу підшипників та забезпечення регламентованих рівнів шуму та вібрації у технологічний процес складання підшипника запропоновано ввести операцію миття підшипникового блоку. Для забезпечення виконання даної операції розроблено інженерну методику та установку для імпульсного магнітно-турбулентного очищення деталей трибосистем кочення (рис.10).

Результати віброакустичного діагностування показали зниження загального рівня шумів і вібрацій після видалення забруднень. В 80% випадків заявленої методики і тривалості очищення було достатньо для практично повного видалення забруднень металевої природи. В 20% випадків було

потрібно провести очищення повторно. Проте в деяких випадках спостерігалось погіршення віброакустичних характеристики підшипників.



а)



б)

Рис. 10. Зовнішній вигляд стенда для імпульсного магнітно-турбулентного очищення трибосистем кочення (а – загальний вигляд, б – підшипники в миючій камері)

Аналізуючи частоти, на яких спостерігалось це явище, було відмічено, що зростання шуму мало місце в основному на низьких частотах. З урахуванням того, що підшипники вже були в експлуатації, справедливим був висновок, що в процесі очищення видалялися залишки мастильного матеріалу (що виконували роль демпферів). Ці дефекти не були видалені під час очищення відомими методами через їх затінення деталями вузла і складну конструкцію трибосистем кочення.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Виконані дослідження та аналіз отриманих результатів показав, що окрім поверхневих дефектів різного типу деталей підшипників кочення, міромеханічні забруднення приповерхневих шарів суттєво негативно впливають на експлуатаційні віброакустичні характеристики, надійність та ресурс трибосистем кочення.

2. Дослідження проблеми оцінки якості та стану трибосистем кочення в зібраному вигляді показали, що найбільш ефективним та інформативним є віброакустичний метод. Його суттєвою перевагою полягає у можливості діагностування практично всіх видів дефектів виготовлення, монтажу й експлуатації трибовузлів.

3. Розроблено та створено лабораторний стенд та методику оцінки віброакустичних характеристик, котрі дають змогу швидко та ефективно оцінювати стан трибосистем кочення, використовуючи аналіз частот 1,0; 2,2; 3,8 кГц у спектрах вібрації й шуму.

4. Вперше виконана оцінка магнітної складової утримання частинок феромагнітної природи на поверхні феромагнітних деталей. Ефективне очищення в цьому випадку можливе лише при використанні в якості основи методу використання змінного імпульсного магнітного поля, яке шляхом інтенсивного перемагнічування дозволяє подолати магнітні поля на межах

доменів, відірвати забруднення з поверхні та видалити їх у миючу рідину.

5. Встановлено, що для якісного очищення складного профілю порожнин трибосистем кочення та затінених елементами конструкції поверхонь необхідно проводити очищення на частотах до 5000 Гц, перевищення цього значення призводить до швидкої втрати інтенсивності потоку миючої рідини та загального зниження ефективності процесу.

6. Для підвищення якості очищення і покращення віброакустичних параметрів, встановлено та реалізовано на лабораторному макеті необхідність забезпечення примусового взаємного переміщення елементів трибосистем кочення застосуванням додаткового змінного магнітного поля індукцією 450...700 мТл, що дає змогу відкрити для обробки значну частину, недоступних функціональних поверхонь в статичному стані через конструкційні особливості об'єкта очищення.

7. За результатами досліджень розроблено інженерну методику проектування технологічних процесів очищення та розроблено стенд імпульсного магнітно-турбулентного очищення трибовузлів кочення з пристроєм розмагнічування, що дозволило досягнути рівня залишкової намагніченості менш ніж 1,0 мТл.

8. Запропонована технологія очищення підшипників на ДП «ЗМКБ «Івченко-Прогрес» авіаційних нерозбірних шарикопідшипників та результати аналізу фазового і гранулометричного складу видалених часток-забруднень, що були видалені під час очищення на розробленому і створеному стенді, показали високу ефективність розробленого способу та пристрою. У 80% випадках заявлена методика і тривалість очищення були високоефективними і забруднення поверхонь металевої природи практично повністю видалялись.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях*

1. Бадір К.К., Аксенов А.Ф., Стельмах О.У. Экспериментальная апробация гипотезы компрессионно-вакуумного механизма трения и изнашивания // Наукові нотатки. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2010. – №28. – С. 9-23. *Особистий внесок дисертанта: встановлено, що з підвищенням в'язкості середовища, збільшенням швидкості ковзання і осьового навантаження зростає ступінь стиснення і розтягування граничних шарів середовища в конфузорній і дифузійній областях трибоконтракту.*

2. Бадір К.К., Стельмах О.У., Шимчук С.П., Радзієвський В.А., Костюнік Р.Є. Экспериментальне дослідження динаміки течій граничних шарів авіагасу та оливи в трибоконтракту ковзання / Наукові нотатки. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2019. – №66. – С. 332-343. *Особистий внесок дисертанта: участь у постановці та проведенні експериментальних досліджень.*

3. Бадір К.К., Стельмах О.У., Андреева Д.В. Экспериментальне порівняння диференціально-фазового методу та методу динамічного фокусування при визначенні параметрів шорсткості поверхонь // Наукоємні технології. – Нац. авіац. ун-т. – Київ, 2010. – №1. – С. 40-43. *Особистий внесок дисертанта: проведено експериментальне порівняння тривимірного мікро- та*

*нано-геометричного стану очищених поверхонь з стандартизованими параметрами шорсткості поверхонь.*

4. Бадир К.К., Аксенов А.Ф., Стельмах А.В., Хуссейн Д.Д., Селезнев Э.Л. Анализ фазового состава смазки в задачах трения // Наукові нотатки. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2011. – №34. – С. 9-12. *Особистий внесок дисертанта: формування мети роботи та розроблення методики експериментальних досліджень.*

5. Бадир К.К., Стельмах А.У., Ибраимов Т.Т., Стельмах Д.А. Реология гидродинамики смазывания деталей машин / Наукові нотатки. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2011. – №34. – С. 270-273. *Особистий внесок дисертанта: проведено порівняння основних положень ЕГД-теорії та компресійно-вакуумної гіпотези тертя, що вказує на істотні відмінності уявлень про фізику процесів і явищ, що відбуваються в граничних шарах.*

6. Бадир К.К., Стельмах А.У. Исследование динамических процессов в граничных слоях смазки на приборах трения с оптическим каналом съема информации / Моделювання та інформаційні технології. – Київ: НАН України. – 2012. – №63. – С. 214-224. *Особистий внесок дисертанта: обґрунтовано доцільність створення оптичного пристрою для дослідження зони контакту тертя-ковзання.*

7. Бадир К.К. Приборы трения с оптическим каналом съема информации о механизме трения скольжения / Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ. – 2013. – №42. – С. 10-13.

8. Бадир К.К., Стельмах А.У., Костюник Р.Е., Стельмах А.В., Софронов О.В. Новые приборы и методы исследования динамических процессов в граничных слоях трибосистем / Вісник інженерної академії. Вип. 2. – 2013. – С. 129-133. *Особистий внесок дисертанта: проведено аналіз існуючих приладів та способів дослідження динамічних процесів у граничних шарах трибосистем та обґрунтування стратегії подальших досліджень.*

9. Бадір К.К., Стельмах А.У., Костюник Р.Е. Десорбционно-адгезионный механизм изнашивания при трении в условиях граничной смазки / Трение и износ. – 2014. – Том 35, №1. – С.24-34. *Особистий внесок дисертанта: запропоновано десорбційно-адгезійний механізм зношування при терті в умовах граничного змащення, що полягає в локалізації адгезійного зношування поверхонь в дифузійній області контакту.*

10. Бадір К.К. Моделювання процесу магніто-турбулентного очищення підшипників кочення / Бадір К.К. // Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – №14 (1). – С. 24-30.

***Публікації у тезах міжнародних та всеукраїнських конференцій***

11. Бадір К.К., Шмаров В.М., Стельмах О.В., Костюнік Р.Є. Трибологічний вимірювально-аналітичний комплекс НАУ-01 / Проблеми хімотології: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції, 20-24 вересня 2010 р. – Київ, 2010. – С. 176-177. *Особистий внесок дисертанта: розроблено концепцію створення трибологічного вимірювально-аналітичного комплексу НАУ-01.*

12. Бадир К.К., Кравченко И.Ф., Ананьев В.Г., Колесник П.А., Единович

А.Б., Аксенов А.Ф., Стельмах А.У. Увеличение ресурса редукторов ГТД с использованием двухфазной масло-воздушной смеси / Материалы УШ Международной научно-практической конференции «Литье-2012», Запорожье, 2012. – С.381-387. *Особистий внесок дисертанта: участь в лабораторних дослідженнях двигунів з конструкторськими доопрацюваннями для організації змащування маслоповітряною сумішшю.*

13. Бадир К.К., Стельмах А.У., Хуссейн Д.Д. Влияние фазового состояния смазки на эффективность трибосистем с ЭГД-контактом / Проблемы химотологии: материалы ІУ Міжнародної науково-технічної конференції, 24-28 вересня 2012 р. – Одеса, 2012. – С. 239-244. *Особистий внесок дисертанта: проведена серія випробувань на приладі тертя АСК-01.*

14. Бадир К.К., Стельмах А.У., Аль-Тамими Р.К., Ибраимов Т.Т. Компрессионно-вакуумный механизм трения и изнашивания / АВІА – 2013: XII Міжнародна науково-технічна конференція, 21-23 травня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – Т.3. –С. 31.54-31.57. *Особистий внесок дисертанта: встановлена наявність потужних динамічних процесів у граничних шарах зон трибоконтракту.*

15. Бадир К.К., Стельмах Д.А., Ибраимов Т.Т. Сравнительный анализ эластогидродинамической и компрессионно-вакуумной гипотез трения / АВІА – 2013: XII Міжнародна науково-технічна конференція, 21-23 травня 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – Т.3. – С. 31.124-31.127. *Особистий внесок дисертанта: встановлено, що зі збільшенням осьового навантаження зростає ступінь стиснення середовища «на вході в контакт» і ступінь його розрідження «на виході з контакту».*

16. Бадир К.К., Стельмах А.У., Ибраимов Т.Т., Стельмах Д.А. Сравнительный анализ эластогидродинамической и компрессионно-вакуумной гипотез трения / Проблемы химотологии. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів: матеріали V Міжнар. науково-техн. конф., 6-10 жовтня 2014 р. – Київ, 2014. – С. 61-65. *Особистий внесок дисертанта: сформульовані основні фізико-технологічні принципи зменшення ступеня розрідження в дифузорних областях трибосистем.*

17. Бадир К.К., Аксенов А.Ф. Стельмах А.У., Хуссейн Д.Д. Влияние фазового состояния смазки на эффективность трибосистем с ЭГД-контактом / Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 11-го Международного научно-техн. семинара, 21-25 февраля 2011 г. – Свалява, 2011. – С. 6-8. *Особистий внесок дисертанта: встановлено, що зі збільшенням швидкості ковзання в ЕГД-контакті сила тертя в області малих швидкостей зростає.*

18. Бадир К.К., Стельмах А.У., Стельмах Д.А. Основные положения эластогидродинамической и компрессионно-вакуумной гипотез трения / Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 11-го Международного научно-техн. семинара, 21-25 февраля 2011 г. – Свалява, 2011. – С.249-251. *Особистий внесок дисертанта: встановлено, що зносостійкість вузлів тертя зменшується за рахунок*

*виникнення розрідження змащувального середовища в дифузійних областях трибоконтактів.*

19. Бадир К.К., Аксенов А.Ф., Стельмах А.У., Хуссейн Д.Д. Влияние фазового состояния смазки на эффективность трибосистем с ЭГД-контактом / АВИА-2011: X Міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня 2011 р.: тези доп. – К., 2011. – Т. II. – С.140-143. *Особистий внесок дисертанта: перевірено ефективність використання маслоповітряної суміші для трибовузлів.*

20. Бадир К.К., Ібраїмов Т.Т., Стельмах Д.А. Сравнительный анализ эластогидродинамической и компрессионно-вакуумной гипотез трения / АВИА-2011: X Міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня 2011 р.: тези доп. – К., 2011. – Т. II. – С.124-127. *Особистий внесок дисертанта: виявлено, що області підвищеного та зниженого тиску змащувального середовища є симетричними відносно лінії максимуму контактних напружень.*

21. Badir K., Klaus Kuncze, Stelmakh O., Stelmakh D. Experimental comparison of differential-phase method and method of dynamic focusing in defining of roughness parameters of surface / АВИА-2011: X Міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня 2011 р.: тези доп. – К., 2011. – Т. II. С.120-123. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень методами відмінної фази і автоматичного фокусування.*

22. Бадир К.К., Аксенов А.Ф., Аль-Тамими Р.К., Стельмах Д.А. Компрессионно-вакуумный механизм трения и изнашивания / АВИА-2011: X Міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня 2011 р.: тези доп. – К., 2011. – Т. II. С.144-147. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень та інтерпретації результатів.*

23. Бадир К.К., Аксенов А.Ф., Стельмах А.У., Аль-Тамими Р.К., Стельмах Д.А. Компрессионно-вакуумный механизм трения и изнашивания / Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 11-й Международной научно-технической конференции, 23-27 мая 2011 г.: тезисы докл. – Ялта, 2011. – С. 11-17. *Особистий внесок дисертанта: участь в проведенні експериментальних досліджень.*

24. Бадир К.К., Стельмах А.У. Приборы и методики исследования динамических процессов в граничных слоях смазки в трибоконтакте / Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 12-го Международного научно-технического семинара, 20-24 февраля 2012 г. – Свалява, 2012. г. – С. 245-247. *Особистий внесок дисертанта: розроблено прилади з оптичними каналами знімання інформації типу АСБ.*

### **Патенти**

25. Бадір К.К., Аксьонов О.Ф., Стельмах О.У., Костюнік Р.Є., Жуков О.В., Вовк В.І., Кущев О.В., Горенко М.В. Прилад безконтактного імпульсного магнітно-турбулентного очищення шарикопідшипників кочення в зборі // Заявлено 22.05.2009; опубл. 10.11.2009; Бюл. №21. – 4 с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень та інтерпретації результатів.*

26. Бадір К.К., Стельмах О.У., Бондар В.С., Ібраїмов Т.Т. Патент на

корисну модель №57465, Україна. МПК G01N 3/56 №201010464. Пристрій визначення трибореологічних характеристик тертя ковзання в умовах граничного змащення // Заявлено 30.08.2010; опубл. 25.02.2011; Бюл. №4. – 4 с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень та інтерпретації результатів.*

27. Бадір К.К., Аксьонов О.Ф., Стельмах О.У., Костюнік Р.Є., Маніта О.С., Кушев О.В., Стельмах О.В., Бондар В.С., Коба В.П., Горенко М.В., Шевченко Р.О., Ковальчук О.Г. Патент на корисну модель №59071, Україна. МПК B08B 3/12 №201006048. Спосіб безконтактного імпульсного магнітно-турбулентного очищення підшипників кочення // Заявлено 19.05.2011; опубл. 10.05.2011; Бюл. №9. – 6 с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень та інтерпретації результатів.*

28. Бадір К.К., Аксьонов О.Ф., Стельмах О.У., Хуфенбах В.А., Кунце К.Б.Ф., Запорожець О.І., Бондар В.С., Стельмах Д.О., Ібраїмов Т.Т., Хуссейн Д.Д., Аль-Тамими Р.К. Патент на корисну модель №65839, Україна. МПК F04B 19/00, F04C 25/00. Спосіб нагнітання і/або створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/газоподібному/високодисперсному, твердому або багатофазовому стані // Заявлено 26.07.2011; опубл. 12.12.2011; Бюл. №23. – 22 с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень та інтерпретації результатів.*

29. Бадір К.К., Стельмах О.У., Аксьонов О.Ф., Хуфенбах В.А., Кунце К.Б.Ф., Запорожець О.І., Бондар В.С., Стельмах Д.О., Ібраїмов Т.Т., Хуссейн Д.Д., Аль-Тамими Р.К. Патент на корисну модель №65840, Україна. МПК F04C 2/00. №201109337 Пристрій для нагнітання і/або створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/газоподібному/ високодисперсному твердому або багатофазовому стані // Заявлено 26.07.2011; опубл. 12.12.2011; Бюл. №23. – 32 с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень та інтерпретації результатів.*

30. Бадір К.К., Стельмах О.У., Аксьонов О.Ф., Хуфенбах В.А., Кунце К.Б.Ф., Запорожець О.І., Бондар В.С., Стельмах Д.О., Ібраїмов Т.Т., Хуссейн Д.Д., Аль-Тамімі Р.К. Спосіб нагнітання і/або створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/ газоподібному/високодисперсному твердому або багатофазовому стані, та пристрій для його здійснення. Патент на корисну модель №99403, Україна. МПК F04B 19/00. – F04B 37/00. №201109338 // Заявлено 26.07.2011; опубл. 25.11.2011; Бюл. №22. – 44 с. *Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень та інтерпретації результатів.*

#### Анотація

**Бадір К.К. Покращення експлуатаційних характеристик підшипників кочення шляхом використання технології фінішної магніто-турбулентної очистки. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – Технологія машинобудування. – Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2019.

Дисертація присвячена розробленню науково-практичних основ

проектування технологічних процесів очищення трибосистем кочення шляхом застосування додаткового змінного магнітно-імпульсного поля з урахуванням закономірностей зв'язку молекулярних, кулонівських та гравітаційних сил з магнітними полями, що діють на межі доменів матеріалу підшипників.

В результаті виконання дисертаційної роботи вирішена науково-прикладна задача високоефективного очищення трибовузлів кочення, використавши технології фінішного видалення мікрозабруднень з поверхонь трибосистем кочення комбінованими магнітно-турбулентними полями. У прикладному плані розв'язання цього завдання створено установку для видалення мікро- та субмікрочастинок ферромагнітної та іншої природи з поверхонь трибосистем кочення на базі джерела змінного імпульсного магнітного поля і розроблена методика проведення очищення на ньому.

**Ключові слова:** забруднення, зносостійкість, очищення, підшипник кочення, віброакустичні характеристики, магнітне поле.

### Аннотация

**Бадир К.К. Повышение эксплуатационных характеристик подшипников качения путем использования технологии финишной магнито-турбулентной очистки. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения. – Луцкий национальный технический университет, Луцк, 2019.

Диссертация посвящена разработке научно-практических основ проектирования технологических процессов очистки трибосистем качения путем применения дополнительного переменного магнитно-импульсного поля с учетом закономерностей связи молекулярных, кулоновских и гравитационных сил с магнитными полями, действующих на границе доменов материала подшипников.

В результате выполнения диссертационной работы решена научно-прикладная задача высокоэффективной очистки трибоузлов качения, используя технологии финишного удаления микрозагрязнений с поверхностей трибосистем качения комбинированными магнитно-турбулентными полями. В прикладном плане решения этой задачи создана установка для удаления микро- и субмикрочастиц ферромагнитной и другой природы с поверхностей трибосистем качения на базе источника переменного импульсного магнитного поля и разработана методика проведения очистки на нем.

**Ключевые слова:** загрязнение, износостойкость, очистка, подшипник качения, виброакустические характеристики, магнитное поле.

### Annotation

**K. Badir Improving the operational characteristics of rolling bearings by introducing the technology of final magneto-turbulent cleaning. – Manuscript.**

The dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.02.08 – technology of mechanical engineering. – Lutsk National Technical University, Lutsk, 2019.



The dissertation is devoted to the development of scientific and practical principles for the design of technological processes for cleaning rolling tribosystems by using an additional alternating magnetic-pulse field, taking into account the laws of the connection of molecular, Coulomb and gravitational forces with magnetic fields acting on the domain boundaries of bearing materials.

The introduction describes the general characteristics of the work, substantiates the relevance of the topic, and formulates the purpose, object, subject of research and tasks that are solved in the thesis. The scientific novelty and practical significance of the obtained results are sufficiently and thoroughly stated. The main provisions considered in the dissertation are formulated, the most important results are presented for defense.

The first section shows that one of the dangerous factors that significantly affects the technical condition of machinery and mechanisms and the safety of transport and production is the contamination of the surfaces of non-dismountable ball bearings. It is shown that the main sources of perturbations, which determine the vibration of the tribosystem rolling, are the technological errors of its manufacture and assembly, as well as foreign objects located on the working surfaces (microparticles of ferromagnetic and other nature). The resulting impact forces depend on the gaps, the imbalance of the moving elements, the presence of contaminants on the working surfaces and in lubricating media and working liquids, as well as on external factors.

The second section analyzes methods for determining the state of rolling bearings by controlling their frequency spectra. It is established that parameters for characterizing the condition of both the individual bearing and all the bearing supports in the product are used to diagnose the bearings.

The results of experimental studies of the influence of the ovality of rolling tracks, axial and radial loads on the level of vibration and noise are presented. It is proved that the reduction of vibration, as the main indicator of quality and condition of bearings, can be achieved not only by improving the quality of manufacture, increasing the number of rolling bodies, but also by the utmost complete removal of contaminants from the working surfaces and fuel and lubricants.

In the third section, a sufficiently correct physico-mathematical model is proposed on the basis of a phenomenological model of retaining ferromagnetic contaminants at the domain boundaries of the surfaces of the ferromagnetic bearing parts. It is shown that in addition to the known forces acting on the ferromagnetic part of the small mass, on the surfaces of massive bearing parts such as adhesion, Coulomb, gravity and Archimedean forces, a significant impact on keeping contaminants belongs coercive forces arising at the boundaries of the particle domains with a single trace contamination.

The hydrodynamic forces arising in turbulent flows, which with simultaneous impulse-magnetic action on micro-contaminants, allow for effective displacement and detachment from the surface with subsequent removal into the accumulation zone are considered separately. It is this combined approach that was chosen for implementation in the developed layouts and stands. Optimal magnetic field strength, pulse rate, and duration of the purification procedure in the selected medium (aviation

gas) were established.

In view of previous studies, rare earth elements with a constant induction of 450 ... 700 mTl were used to create a source of alternating pulsed magnetic field. Taking into account the distance to the object of purification and screening, the elements of the design of the developed stand of the author managed to realize a pulse induction in the working area of 100 mTl, which allowed to carry out the purification of bearings with a height of rings up to 15 mm in one-way positioning and up to 35 mm in two-way position. The implemented reversing of the bearing cleaning improves the quality of the micro-contamination removal technology and reduces the duration of the procedure.

In the fourth section, fractography and micro-X-ray spectral studies of contaminants removed from bearing surfaces pre-cleaned with standard factory technology were performed. In addition to the microstrip characteristic of grinding parts of bearings, metal-abrasive particles have also been found, which is also a product of processing technology for parts. Detected micro-contaminants of non-ferrous metals (copper, aluminum, tin, etc.) indicate that in pulsed magnetic fields, these particles become magnetically sensitive due to Foucault currents.

The results of vibroacoustic evaluation of rolling tribosystems, which passed all stages of the industrial purification (including ultrasonic), before and after purification by the developed pulsed magnetic-turbulent method convincingly indicate a significant increase of the quality of tributary nodes (especially in the high frequency spectrum), by the criteria of the general level of vibration. After clearing the bearings on the stand created by the technology developed, the total level of their vibrations decreased by 5 ... 11%.

The fifth section presents the data on the developed laboratory stand and methods of evaluation of the vibro-acoustic characteristics of the rolling bearings, which were implemented using the original design solutions.

The purification results in a reduction in friction torque of an average of 0.05 N·m and a total vibration level of more than 3 dB. On the basis of such laboratory experiments, an engineering technique was developed and an installation pulse magnetic-turbulent purification of the parts of the rolling tribosystems was assembled. In 80% of cases of implementation of the claimed method and duration of purification, practically complete removal of contamination of metallic nature took place, in 20% – repeated purification was performed.

**Keywords:** contamination, durability, cleaning, rolling bearing, vibroacoustic characteristics, magnetic field.

Підписано до друку 25.10.19. Формат 60x84/6.  
Папір офісний. Гарнітура Times New Roman.  
Обл.-вид. арк.0,7. Ум. друк. арк. 0,75. Тираж 100 прим. Зам. 26

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИДАВНИЧИЙ ВІДДІЛ  
ЛУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
43018, Україна, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

