УДК 621.822.74:620.179.16 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21605

О. У. СТЕЛЬМАХ[1], Р. Є. КОСТЮНІК[1], Р.Г. МНАЦАКАНОВ[1], О. В. КУЩЕВ[1], С. П. ШИМЧУК[2]

[1]Національний університет "Київський авіаційний інститут", Україна
[2]Луцький національний технічний університет, Україна

СТЕНД КОНТРОЛЮ МІКРОЗАБРУДНЕННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЯКІСНОЇ ДІАГНОСТИКИ МІНІАТЮРНИХ ШАРИКОПІДШИПНИКІВ

Проведено оцінку конструктивних особливостей, науково-практичного потенціалу та ефективності застосування новоствореного чотириканального вимірювального стенду вхідного контролю мікрозабруднень мініатюрних і прецизійних кулькових підшипників, призначених для прецизійних механічних систем авіаційної та оборонної техніки. Проаналізовано негативний вплив сторонніх твердих і м'яких мікрочастинок на деградацію робочих поверхонь доріжок кочення, що призводить до локальних надвисоких контактних напружень, абразивного зносу, заклинювання та інтенсивного втомного викришування. Обґрунтовано впровадження інвертованої кінематичної схеми стенду, за якої обертається зовнішнє кільце підшипника, а датчики монтуються на нерухомому внутрішньому валу, що забезпечує безконтактний магнітний розгін, виключення сторонніх завад, максимальну чутливість до мікрочастинок бруду та захист сенсорів від динамічних похибок обертання. Описано технічні характеристики синхронного чотириканального збору даних, який об'єднує оптичний канал для фіксації частоти обертання і часу вибігу, вібраційний канал для цифрової обробки сигналів і обчислення пік-фактора й ексцесу, акустичний канал на базі датчика акустичної емісії та мікрофона, а також силовий канал для точної реєстрації чистого моменту тертя методом реакції корпусу. Проведено серію експериментальних порівняльних вимірювань двох партій мініатронних підшипників NTN 61901ZZ/5K та FAG 6001–C–2HRS до та після проведення процедури реновації. Одержано позитивні результати відновлення віброакустичних характеристик деталей за допомогою комбінованого імпульсно магнітно-турбулентного та ультразвукового очищення в розчиннику нефрас. Доведено, що використання такого комбінованого впливу знижує показники вібропришвидшення підшипників на 66–75%, а коефіцієнт варіації часу вибігу зменшується з початкових 38–42% до 9–28%, забезпечуючи високу однорідність відновленої партії. Одержано підтвердження ефективності методу вільного вибігу як самостійного первинного інструменту експрес-діагностики промислової чистоти та виявлення незворотних геометричних дефектів без залучення складного спектрального аналізу. Проведено оцінку економічного ефекту від впровадження розробленого стенду на авіаремонтних підприємствах за рахунок автоматизації контролю, відновлення придатних деталей та уникнення передчасних відмов навігаційних приладів.

Ключові слова: *стенд вхідного контролю, мікрозабруднення підшипників, імпульсно магнітно–турбулентне очищення, ультразвукове очищення, випробування, коефіцієнт варіації, вібродіагностика, ефект бронзової притирки, економічний ефект, мініатюрні підшипники, авіаційна техніка.*

Вступ і постановка проблеми. Мікрозабруднення робочих поверхонь мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників є одним із найбільш недооцінених факторів деградації високоточних механічних систем авіаційного,

аерокосмічного та оборонного призначення. Навіть нові підшипники після зберігання і транспортування можуть містити на поверхнях доріжок кочення тверді мікрочастинки металевого або органічного походження, надлишкові продукти хімічних взаємодій між металом і мастилом, а також продукти зносу [1, 2]. Сторонні тверді чи м'які мікрочастинки (кварцовий пісок, металевий технологічний пил, текстильні волокна) товщиною або діаметром у кілька мікронів перевищують товщину розділювальної гідродинамічної масляної плівки. Це призводить до виникнення локальних надвисоких контактних напружень, абразивного зносу, заклинювання та інтенсивного втомного викришування (пітінгу).

Практика авіаремонтних підприємств–виробників свідчить, що від 15 до 40% підшипників, відхилених при вхідному контролі, є насправді придатними до використання після належного очищення і перезмащування [3]. Натомість хибнопозитивні приймальні рішення — допуск забруднених підшипників у прецизійні вузли — несуть значно серйозніші наслідки: передчасний знос, підвищена вібрація, порушення точності приладів орієнтації та навігації, аварійний вихід з ладу високовартих агрегатів [4, 5].

Аналіз публікацій [6–10] показує, що сучасні промислові стенди вхідного контролю підшипників орієнтовані переважно на вимірювання вібрації за стандартами ISO 15242 при фіксованій швидкості обертання (1800 об/хв), та не мають можливості реєструвати час вільного вибігу як інтегральний індикатор стану. Водночас саме метод вибігу, розвинутий колективом авторів у попередніх дослідженнях [1, 2], дозволяє виявляти мікрозабруднення ще до появи помітних змін у вібропараметрах. Відсутність спеціалізованого стенду, що поєднує чотири незалежних вимірювальних канали та метод вибігу в єдиному діагностичному комплексі для мініатюрних підшипників, і є науково–практичною прогалиною, усуненню якої присвячена дана стаття.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Проблема конструювання стендів для вібраційного контролю підшипників привертає увагу дослідників різних країн. Найбільш системним є огляд Wrzochal M. (2023) [6], опублікований у The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, де детально проаналізовано конструктивні рішення промислових стендів SKF, SUGAWARA, BALTECH, ZYS та PDI. Автор класифікує стенди за п'ятьма ключовими вузлами: шпиндельний вузол, привідний вузол, затискний вузол, вузол датчиків і вузол передачі даних. Встановлено, що найбільш точні результати забезпечує стенд із гібридним (пневматично–пружинним) затискним вузлом і постійно співвісним шпинделем без поворотного важеля.

Wrzochal M. (2023) [7] у суміжній публікації також запропонував новий метод метрологічної оцінки стендів через порівняльні вимірювання одного підшипника 6205ZZ на трьох різних системах. Показано, що відносна похибка між системами у смузі HF може досягати 49% — що підкреслює критичну важливість конструктивних рішень для достовірності результатів вхідного контролю.

Geonea et al. (2025) [8] розробили експериментальний стенд для визначення моменту тертя радіальних кулькових підшипників і провели його верифікацію. Конструкція включає датчик навантаження, термопару та мініатюрний акселерометр. Водночас автори не включили в стенд оптичний канал реєстрації часу вибігу — що, як показали дослідження [1], є ключовим параметром для діагностики партій мініатюрних підшипників.

Burda et al. (2022) [9] у широкому огляді методів вібраційного аналізу для діагностики підшипників у машинах зазначили, що вібраційний аналіз є найефективнішим способом оцінки стану підшипника. Однак огляд охоплює лише підшипники, що вже знаходяться в експлуатації, тоді як задача вхідного контролю нових підшипників на предмет мікрозабруднення залишається за рамками даної роботи.

Tiboni et al. (2022) [10] систематизували методи вібраційного моніторингу обертального обладнання, розглянувши часові, частотні та часово–частотні методи. Їхній аналіз підтверджує, що поєднання FFT–аналізу з статистичними параметрами (пік–фактор, ексцес) дає найбільш інформативний результат для задач класифікації стану. Саме такий підхід реалізовано у вібраційному каналі розробленого стенду.

Автори [1, 2] вперше запропонували і верифікували метод діагностування мікрозабруднення мініатюрних підшипників за часом вибігу. Встановлено, що коефіцієнт варіації CV при ефекті бронзової притирки досягає 38–55%, тоді як після проведення комбінованого ІМТ і УЗ очищення знижується до 5–9%. Ці роботи є безпосередньою науковою базою розробки описаного в даній статті стенду.

Мета роботи – розробка, конструктивне обґрунтування та експериментальне дослідження чотирьохканального вимірювального стенду вхідного контролю мікрозабруднень мініатюрних і прецизійних кулькових підшипників, що застосовуються у високоточних механічних системах авіаційної, аерокосмічної та оборонної техніки.

Конструктивні особливості стенду вхідного контролю: **загальна компоновка та принципові рішення.** Розроблений дослідний лабораторний зразок стенду вхідного контролю мікрозабруднення (СВКМ) є спеціалізованим прецизійним приладом для дослідження мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників з внутрішнім діаметром 5–16 мм методом вільного вибігу з n_0 = 1000 об/хв. Загальна компоновка базується на двох функціональних модулях: вимірювальному та обчислювальному.



Рис. 1. Загальний вигляд стенду вхідного контролю мікрозабруднення.

Принципова відмінність СВКМ від відомих промислових стендів класу SUGAWARA, SKF MVH та BALTECH полягає у такому: по–перше, швидкість вимірювання n_0 = 1000 об/хв замість стандартних 1800 об/хв, що відповідає реальному режиму роботи мініатюрних підшипників приладів орієнтації; по–друге, обов'язкова реєстрація часу вибігу як окремий оптичний канал, відсутній у промислових аналогах [6]; по–третє, синхронне чотириканальне вимірювання

замість послідовного, що дає змогу фіксувати кореляцію між параметрами в режимі реального часу.

Центральним конструктивним рішенням СВКМ, що відрізняє його від більшості відомих стендів, є інвертована кінематична схема: обертається зовнішнє кільце підшипника, тоді як усі датчики змонтовані на нерухомому внутрішньому валу. Це рішення є технічно найбільш грамотним та математично обґрунтованим саме для діагностики мініатюрних підшипників, оскільки одночасно вирішує чотири самостійні інженерні проблеми: передачу сигналу без спотворень, виключення сторонніх завад, точність вимірювання мікромоментів та захист сенсорів від динамічних похибок.

Обґрунтування першого принципу – безконтактне обертання: Розгін зовнішнього кільця з алюмінієвим маховиком здійснюється безконтактно змінним магнітним полем (індукційний принцип за рахунок вихрових струмів) до швидкості 2000 об/хв. Відсутність механічного приводу (пасків, муфт, валів двигунів) ліквідує джерела стороннього механічного шуму.

Відсутність обертових кабелів та струмознімачів. Якби датчики були змонтовані на обертовому валу, сигнали від них довелося б передавати через контактні кільця (щітки) або бездротові модулі. Контактні щітки генерують власний потужний високочастотний шум і створюють додатковий момент тертя, що повністю нівелює корисний сигнал від мініатюрного підшипника, момент тертя якого вимірюється в діапазоні одиниць мН·м. Бездротові передавальні плати додають масу на обертову частину, змінюючи момент інерції системи під час вибігу і вносячи систематичну похибку в ключовий параметр $t_{вибігу}$. Монтаж датчиків на нерухомому валу усуває обидві проблеми одночасно: сигнали передаються класичними екранованими кабелями безпосередньо до модуля збору даних, залишаючись незабрудненими електромагнітними завадами.

Обґрунтування другого принципу – максимальна чутливість до мікрочастинок забруднення. Кінематика кільця визначає траєкторію руху забруднення всередині підшипника. Під дією відцентрових сил, що виникають при обертанні зовнішнього кільця, важкі частинки бруду та продукти зносу (пісок, фрагменти бронзового сепаратора, металева стружка) відкидаються до зовнішньої доріжки кочення. Саме там відбувається найінтенсивніша абразивна взаємодія при перекочуванні кульок по шарі мікрозабруднення. Сигнал від цього контакту передається через тіла кочення безпосередньо на внутрішнє кільце. Оскільки внутрішній вал нерухомий, датчик вібрації сприймає цей імпульс миттєво, без динамічного спотворення, яке неминуче виникало б при власному обертанні датчика разом із внутрішнім валом.

Обґрунтування третього принципу – чистота вимірювання моменту тертя при вибігу. Для мініатюрних і прецизійних шарикопідшипників момент тертя становить одиниці–десятки мкН·м. При монтажі датчика моменту на нерухомому валу він вимірює виключно силу реакції – чистий момент гальмування підшипника. Якби обертався внутрішній вал, датчик фіксував би сукупність трьох паразитних складових: аеродинамічний опір самого ротора, дисбаланс мас та вібрацію приводного двигуна. Для мініатюрних підшипників ці паразитні складові можуть перевищувати корисний сигнал у 5–20 разів. Інвертована схема гарантує, що датчик моменту "бачить" виключно те, що відбувається всередині підшипника.

Обґрунтування четвертого принципу – фізичний захист сенсорів від "роторного" шуму. Коли датчик вібрації (акселерометр) обертається, на його

п'єзоелемент постійно діє доцентрове прискорення $a_c = \omega^2 \cdot r$, де r – відстань від осі обертання. Так при n = 1000 об/хв і r = 5 мм це прискорення становить ~54 м/с², що є суттєвим зміщенням нуля для MEMS–акселерометра з діапазоном ±50 м/с². Крім того, найменший дисбаланс маси обертового датчика генерує низькочастотний паразитний сигнал на частоті обертання f = 16,67 Гц , що діятиме в робочій смузі LO (0–500 Гц). Нерухоме встановлення датчиків вібрації та високочуттєвих мікрофонів на внутрішньому валу забезпечує стабільне робоче середовище для сенсорів: кожен зареєстрований імпульс є гарантованим наслідком внутрішнього дефекту або мікрозабруднення, а не артефактом обертання вимірювальної системи.

Таким чином, кінематична інверсія (зовнішнє кільце обертається, внутрішній посадковий вал нерухомий) є не просто конструктивним компромісом, а єдиним технічно коректним рішенням для стенду вхідного контролю мініатюрних підшипників. Дана схема відповідає рекомендаціям ISO 15242–2 [11] щодо методики вимірювання для радіальних шарикопідшипників та підтверджена результатами порівняльного аналізу Wrzochal M. [6], який встановив, що найбільш точні стенди (SKF MVH, SUGAWARA AM–7) також використовують нерухомий вимірювальний шпиндель, хоча для звичайних (не мініатюрних) типорозмірів.

Характеристика каналу №1 – оптичного каналу. Оптичний канал забезпечує вимірювання двох параметрів: поточної частоти обертання $n(t)$ та часу вибігу $t_{вибігу}$. Для вимірювання $n(t)$ використовується оптоелектронний тахогенератор (ОТГ) зі щілинним диском, встановленим на шпинделі стенду. Дискретність вимірювання – 1 імпульс на оберт при 120 прорізах диску, що забезпечує роздільну здатність $\Delta n = \pm$ 0,5 об/хв при n = 1000 об/хв. Час вибігу реєструється з моменту відключення приводу ($t_{поч.}$) до досягнення порогу n < 5 об/хв. Похибка вимірювання $t_{виб}$ не перевищує ±0,02 с при загальних значеннях 1–8 хв. Профіль $n(t)$ записується з частотою 10 Гц і дозволяє обчислювати миттєвий момент тертя через dn/dt. Особливістю каналу є можливість роботи як у режимі одиночного вимірювання, так і у режимі серійного контролю (автоматичний перезапуск циклу після зупинки підшипника).

Характеристика каналу №2 – вібраційний канал**.** Вібраційний канал включає два незалежних первинних перетворювачі: мініатюрний п'єзоелектричний акселерометр типу MEMS (чутливість 10 мВ/(м/с²), діапазон 0,1–10 000 Гц) та п'єзокерамічний датчик контактного типу (діапазон 0,5–20 кГц). Датчики розміщуються в спеціальній обоймі на корпусі валу внутрішнього кільця підшипника під фіксованим нормальним зусиллям притиску 0,5 ± 0,05 Н, що відповідає рекомендаціям ISO 15242–1 [11] щодо вимірювання малих підшипників. Цифрова обробка сигналу включає FFT–перетворення (N = 4096, вікно Ханна, f_s = 25,6 кГц) з обчисленням таких параметрів: вібропришвидшення у смугах LO (0–500 Гц) та HI (500–4000 Гц), м/с²; RMS–значення сигналу; пік–фактор CF = x_peak / x_RMS; ексцес Kurtosis K. Додатково обчислюються амплітуди на характеристичних частотах BPFO, BPFI, BSF, FTF, розрахованих за геометрією конкретного типу підшипника. Відношення сигнал/шум SNR_bearing на BPFI є ключовим маркером ефекту бронзової притирки.

Характеристика каналу №3 – акустичний канал**.** Акустичний канал складається з двох елементів: широкосмугового датчика акустичної емісії (АЕ) з діапазоном 100–400 кГц (для реєстрації сигналів мікротріщин і мікроударів кульок об забруднення) та прецизійного мікрофону з діапазоном 20 Гц – 20 кГц

для реєстрації аудіочастотних шумів підшипника. Датчик АЕ кріпиться до посадкового валу внутрішнього кільця через звукопровідну пасту, що виключає акустичний зазор. Аналіз АЕ–сигналу ведеться в режимі лічби подій (counts): різке зростання частоти АЕ–подій понад 500/с є ознакою наявності твердих металевих частинок (сталеве забруднення). Для бронзової притирки характерно зростання рівня шуму у смузі 2–5 кГц при відносно незмінному рівні АЕ — що дозволяє диференціювати два типи забруднення навіть без FFT–аналізу вібраційного каналу. Ця закономірність підтверджена експериментальними результатами вимірювань на партіях NTN і FAG, де підшипники з ефектом бронзової притирки давали рівень шуму мікрофонного каналу на 8–12 дБ вище, ніж "чисті" підшипники, тоді як рівень АЕ залишався близьким до базового.

Характеристика каналу №4 – силовий канал**.** Силовий канал вимірює момент тертя $M_т$ (мН·м) методом реакції корпусу: нерухомий посадковий вал інтегрований із горизонтальною фланцевою поверхнею промислового датчика вимірювального приладу AXIS FSC2. Прилад має межу вимірювання крутного моменту до 2 Нм з дискретністю 0,001 Нм і швидкістю опитування до 1000 вибірок/секунду через USB–інтерфейс. Завдяки жорсткому кріпленню фланця до масивної металевої станини, датчик реєструє чистий реактивний момент гальмування підшипника.

Порівняльна характеристика СВКМ та промислових аналогів. Для оцінки конкурентних переваг СВКМ проведено порівняльний аналіз із найбільш відомими промисловими стендами. Результати представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика стендів контролю вібрації підшипників

Параметр	SUGAWARA AM–7	SKF MVH–90	BALTECH VP–3410	PDI Anderom.	СВКМ (розробл.)
Швидкість вимірювання, об/хв	1800	1800	1800	1800	1000*
Вимірювання часу вибігу	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
Кількість каналів	1 (вібр.)	1 (вібр.)	1 (вібр.)	1 (вібр.)	4
АЕ–датчик	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
Момент тертя	Ні	Ні	Так	Ні	Так
FFT–аналіз у режимі реального часу	Так	Так	Так	Аналог.	Так
Мінімальний діаметр d, мм	10	10	10	15	5
Клас точності	Висока	Висока	Середня	Середня	Висока

* Обґрунтування n_0=1000 об/хв: відповідає реальному режиму мініатюрних підшипників приладів орієнтації [11].

Як видно з таблиці 1, запропонований СВКМ є єдиним стендом, що поєднує чотириканальне вимірювання з реєстрацією часу вибігу при швидкості, характерній для мініатюрних прецизійних шарикопідшипників.

Методика та об'єкти експериментального дослідження. Об'єктами дослідження є два типи мініатюрних кулькових підшипників із бронзовим сепаратором Т2, відібраних з партій підшипників після фактичної експлуатації в приладових системах авіаційної техніки:

1) NTN 61901ZZ/5K – клас точності 5, металевий екран ZZ, сепаратор Т2 (БрОФ6,5-0,15). Аналог ISO: 61901. Кількість тіл кочення Z=8, Dw=3,175 мм;

2) FAG 6001-C-2HRS – клас точності звичайний, гумові ущільнення 2HRS, сепаратор Т2. Аналог ISO: 6001. Кількість тіл кочення Z=10, Dw=4,762 мм.

Кожна партія шарикопідшипників вимірювалися у чотирьох конфігураціях: лицьова/зворотна сторона при реалізації безконтакного обертання за/проти годинникової стрілки. Результат для кожного підшипника – середнє з чотирьох конфігурацій. Дослідження проводилися у два етапи:

1) Первинні вимірювання (до проведення комбінованого ІМТ і УЗ очищення): реєстрація вібропришвидшення LO, HI (м/с²); віброшвидкості (мм/с); амплітуди зміщення (мм); часу вибігу (хв) на СВКМ при n_0 = 1000 об/хв.

2) Комбіноване ІМТ і УЗ очищення на розробленому та створеному стенді з використанням імпульсно магнітно-турбулентних та УЗ полів при $f_{УЗ1}$ = 43 ± 2 кГц, $f_{УЗ2}$ = 28 ± 2 кГц t = 15 ± 1 хв, T = 50 ± 5 °С (розчинник — нефрас С2-80/120); сушіння; перезмащування маслом ІПМ-10; витримка ≥ 30 хв.

Повторні вимірювання (після очищення): ті самі параметри і конфігурації. Для оцінки однорідності партії обчислювався коефіцієнт варіації $CV = \sigma(t_{виб}) / \bar{t}_{виб} \times 100\%$. Статистична обробка результатів включала обчислення середнього значення $\bar{x}$, стандартного відхилення σ, CV для кожного параметра. Достовірність різниці між вибірками до і після очищення перевірялася за критерієм Стьюдента при рівні значущості $p < 0,05$.

Результати вимірювань та їх аналіз. У таблиці 2 наведено зведені результати вимірювань ключових параметрів для обох партій підшипників до і після комбінованого ІМТ і УЗ очищення (середні значення по партії).

Таблиця 2

Зведені результати вимірювань обох партій до та після ІМТ і УЗ очищення

Параметр	NTN до	NTN після	Δ NTN	FAG до	FAG після	Δ FAG
Вібропришв. LO, м/с²	18,2	5,1	−72%	19,2	6,6	−66%
Вібропришв. HI, м/с²	33,3	8,3	−75%	40,6	12,3	−70%
Vіброшвидкість, мм/с	12,4	3,5	−72%	11,4	4,3	−62%
Амплітуда зміщення, мм	0,094	0,040	−57%	0,085	0,046	−46%
Час вибігу, хв	3,2	3,2	~0%	3,1	2,8	−10%
CVt часу вибігу, %	38%	9%	−76%	42%	28%	−33%
Пік-фактор CF	5,8	1,9	−67%	6,2	2,4	−61%
Ексцес Kurtosis	4,9	2,8	−43%	5,3	3,1	−42%

Результати чотириканального вимірювання дозволили класифікувати стан шарикопідшипників кожної партії до комбінованого ІМТ і УЗ очищення. Виявлено типи забруднення, які представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Класифікація стану шарикопідшипників за результатами чотириканального вимірювання СВКМ

Підш. №	Серія	Тип забруд.	Спектральна ознака	CVt, %	Рішення
П-1–4, П-6–10	NTN	Бронзова притирка	SNR_BPFI > 3, CF = 4,2–5,8, FTF-пік	38 (до) →9 (після)	ІМТ і УЗ очищення → Норма
П-5	NTN	Гранична зона	CF = 5,1, CVt >15%	14 (після)	Повторне ІМТ і УЗ очищення
П-1–7	FAG	Бронзова притирка	SNR_BPFI > 3, CF = 4,5–6,0	42 (до)	Очищення ІМТ і УЗ
П-8	FAG	Мішане забруднення	CF=7,1, E_ratio=5,8, AE > 500/с	—	Комбіноване ІМТ і УЗ очищення, контроль
П-9–10	FAG	Незворотний дефект	$t_{виб}$ аномальний до і після	28 (після)	Відбраковування

Ключовим науковим результатом дослідження є підтвердження методу вибігу як самостійного і достатнього інструменту первинної діагностики стану партії мініатюрних підшипників. Цей метод має три унікальні властивості, відсутні у класичних вібраційних методах.

По-перше, інтегральний характер: час вибігу відображає сумарний момент тертя, що включає в'язкісну, пружногістерезисну та контактну складові. Жоден окремий вібропараметр не має цієї властивості. Серед трьох серій, розглянутих у нашому дослідженні, CVt завжди реагував на ефект бронзової притирки першим – до появи помітних змін у LO/HI.

По-друге, відносний характер у межах партії: не потрібно знати абсолютний норматив часу вибігу для конкретного типу підшипника. Класифікатор порівнює підшипники між собою. Це усуває залежність від умов вимірювання (температура, доза мастила) і підвищує відтворюваність результатів. Для партії NTN після очищення CVt = 9% – тобто всі підшипники відтворюють час вибігу з точністю ±9% від середнього.

По-третє, виявлення незворотних дефектів: підшипники FAG П-9 і П-10, у яких $t_{виб}$ залишився аномальним після очищення, однозначно ідентифіковані як дефектні без жодного додаткового аналізу спектру. Класичний FFT-аналіз дав би менш чіткий результат через маскування сигналу забруднення на фоні основного вібраційного рівня.

Економічний ефект від впровадження СВКМ на авіаремонтних підприємствах оцінюється за трьома складовими:

1. Уникнення витрат на передчасний вихід з ладу підшипників, допущених із забрудненими поверхнями;

2. Відновлення придатних до використання підшипників замість їх хибного відбраковування та закупівлі нових;

3. Зниження витрат ручної праці при контролі та очищенні завдяки автоматизованій реєстрації результатів.

Відповідно до промислових даних УЗ-очищення в авіаційній галузі [12–14], впровадження ультразвукових технологій скорочує трудомісткість ручного очищення у 5–7 разів і практично виключає ймовірність пропуску мікрозабруднень, яка при ручному контролі становить 8–15%. Розрахунок виконано для типового авіаремонтного підприємства з річним обсягом вхідного контролю 1000 мініатюрних шарикопідшипників.

Крім прямого економічного ефекту, впровадження СВКМ забезпечує ряд важко квантифікованих, але практично значущих переваг:

По-перше, підвищення надійності авіаційної техніки: зниження ймовірності відмов через забруднені підшипники прямо корелює зі зниженням ризику льотних подій — вартість яких незмірно перевищує будь-які витрати на вхідний контроль [14].

По-друге, екологічний ефект: Комбіноване ІМТ і УЗ очищення виключає застосування агресивних розчинників у ручних операціях і знижує обсяг хімічних відходів [15].

По-третє, стандартизація даних: автоматизована реєстрація результатів СВКМ формує трасувальну базу даних для кожної партії підшипників, що є обов'язковою умовою сертифікації за AS9100 та підтвердження відповідності вимогам MIL-PRF-19246.

Обговорення результатів. Отримані результати свідчать про те, що СВКМ успішно виконує поставлені діагностичні задачі. Порівняно з існуючими промисловими стендами [6, 7], запропонований дослідний зразок приладу має такі принципові переваги: чотири незалежних канали замість одного; метод вибігу як унікальний параметр; орієнтація на мініатюрні підшипники ($d \geq 5$ мм) замість звичайних промислових типів.

Водночас слід вказати, що дані отримані для двох конкретних серій підшипників; коефіцієнти класифікатора потребують верифікації для інших типів, особливо з нейлоновим або сталевим сепаратором. Економічний ефект на конкретному підприємстві може відрізнятися залежно від обсягу партій та відсотка забруднених підшипників. УЗ-реновація не є ефективною для підшипників з геометричними дефектами кілець або катастрофічним зносом – таких підшипників у наших партіях FAG виявлено 20% (П-9, П-10), що вже само по собі підкреслює важливість вхідного контролю.

Перспективи подальшого розвитку СВКМ включають: автоматизацію циклу завантаження/вивантаження підшипників для серійного контролю; інтеграцію з базами даних підприємства через протокол OPC-UA; розробку нейромережевого класифікатора на основі накопиченої бази вимірювань для автоматичного встановлення порогових значень φ без участі оператора.

Висновки

1. Розроблено дослідний лабораторний зразок стенду вхідного контролю мікрозабруднення (СВКМ) мініатюрних шарикопідшипників прецизійних механічних систем, що поєднує чотири незалежних вимірювальних канали (оптичний, вібраційний, акустичний, силовий) та метод вільного вибігу в єдиному

діагностичному комплексі. СВКМ є першим стендом такого класу, що реєструє час вибігу як самостійний канал вимірювань.

2. Результати порівняльних вимірювань двох партій шарикопідшипників NTN 61901ZZ/5K та FAG 6001-C-2HRS підтвердили ефективність комбінованого методу очищення: зниження вібропришвидшення на 66–75%, коефіцієнту варіації з 38–42% до 9–28%. Підшипники з незворотними дефектами (FAG П-9, П-10) однозначно ідентифікуються за аномальним часом вибігу після комбінованого ІМТ і УЗ очищення без додаткового спектрального аналізу.

3. Метод вибігу підтверджено як самостійний первинний інструмент діагностики партій мініатюрних підшипників. Його інтегральний і відносний характер забезпечують виявлення ефекту бронзової притирки та незворотних дефектів геометрії з надійністю, недосяжною для класичних вібраційних методів при контролі малих партій.

4. Експериментально встановлено, що комплексний підхід, який поєднує вібродіагностику та контроль промислової чистоти, дозволяє більш коректно контролювати стан шарикопідшипників, а при певному підході відновлювати їх віброакустичні характеристики у 15–35 % випадків, а для окремих виробів — до 65 %. Це забезпечує можливість повторного введення шарикопідшипників у експлуатацію без втрати надійності і ресурсу та сприяє суттєвому зниженню витрат на ремонт прецизійних механічних систем і високоточних пристроїв.

5. Подальший розвиток стенду передбачає інтеграцію нейромережевого класифікатора стану підшипників для автоматичного встановлення порогових значень відповідних коефіцієнтів за накопиченою базою вимірювань, а також автоматизацію циклу контролю для серійного застосування на виробничих лініях.

Список літератури

1. Stelmakh O. U., Kostyunik R. E., Shymchuk S. P., Kushchev O. V. Renovation of vibration characteristics of miniature ball bearings of precision mechanical systems of aerospace and military equipment. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*. 2024. Vol. 1(22). P. 314–319. https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1374

2. Kostyunik R., Mikosianchyk O., Stelmakh A. et al. An innovative approach to non-contact cleaning of mini-ball bearings. *Journal of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 12(2). P. A10–A19. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).a2

3. Stelmakh A., Kostyunik R., Mikosianchyk O. et al. Improvement of operational parameters for precision rolling bearings by cleaning working surfaces from micro pollution of various nature. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10(1). P. A31–A40. https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a5

4. Ikhsan A., Gasnia D., Rusli M. Wear Patterns on Ball Bearings Lubricated by Grease under Different Solid Contaminants. *Tribology in Industry*. 2025. Vol. 47(2). P. 202–216. DOI: 10.24874/ti.1893.02.25.04

5. Gupta A. et al. Friction torque prediction of precision ball bearing unit for reaction wheel actuators for spacecraft applications. *Int. J. System Assurance Engineering and Management*. 2025. https://doi.org/10.1007/s13198-024-02699-9

6. Wrzochal M. Comparative analysis of the structural solutions of bearing vibration test equipment used in quality control procedures. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 125(9). P. 4047–4063. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11029-5

7. Wrzochal M. New method of metrological evaluation of industrial rolling bearing vibration measurement systems. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124. P. 587–600. https://doi.org/10.1007/s00170-022-10359-0

8. Geonea I., Dumitru N., Dumitru I. Experimental Analysis of Frictional Torque from Radial Ball Bearings. Proc. CONAT 2024 International Congress of Automotive and Transport Engineering. Springer, Cham, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77627-4_19

9. Burda E. A., Zusman G. V., Kudryavtseva I. S., Naumenko A. P. An overview of vibration analysis techniques for the fault diagnostics of rolling bearings in machinery. *Shock and Vibration*. 2022. P. 1–14. https://doi.org/10.1155/2022/6136231

10. Tiboni M., Bussola R., Remino C., Amici C. A review on vibration based condition monitoring of rotating machinery. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(3). Art. 972. https://doi.org/10.3390/app12030972

11. ISO 15242-1:2004. Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 1: Fundamentals. Geneva: ISO, 2004.

12. Kemet International Ltd. Ultrasonic cleaning solutions for the aerospace and aviation industry. Technical Report. Kemet, UK, 2024. URL: https://www.kemet.co.uk/blog/cleaning/ultrasonic-cleaning-aerospace

13. UPC Corp. How Ultrasonic Cleaning Reduces High Aerospace Labor Costs without Eliminating Jobs. Technical Article. 2024. URL: https://www.upcorp.com/blog

14. Tovatech LLC. Ultrasonic Cleaning for Aerospace and Defense: non-abrasive cleaning, micron-level particle removal. *Product Overview*. 2024. URL: https://www.tovatech.com/aerospace

15. Wu P. L., He C. L., Chang Z. et al. Theoretical calculation models and measurement of friction torque for rolling bearings: state of the art. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. Art. 435. https://doi.org/10.1007/s40430-022-03726-1

16. Tiwari M., Rath K. Effect of Surface Roughness on the Friction Moment in a Lubricated Deep Groove Ball Bearing. *Lubricants*. 2024. Vol. 12(12). Art. 443. https://doi.org/10.3390/lubricants12120443

17. Bhandare R. V. et al. Fault Diagnosis and Prediction of Remaining Useful Life (RUL) of Rolling Element Bearing: A review. Tribologia – Finnish Journal of Tribology. 2024. Vol. 41(1–2).

18. ISO 15242-1:2004. Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 1: Fundamentals. Geneva: ISO, 2004.

19. ДСТУ ГОСТ 520:2014 Підшипники кочення. Загальні технічні умови (ГОСТ 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ). – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2014. – 70 с.

Отримано: 01 вересня 2026
Прийнято: 05 вересня 2026
Опубліковано: 18 жовтня 2026

Стельмах Олександр Устимович – докт. техн. наук, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій, запрошений професор Пекінського технологічного інституту, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: stelmah@nau.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-9132-6334

Костюнік Руслан Євгенович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: kostynik_rus@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-0232-9208

Мнацаканов Рудольф Георгійович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри авіаційного транспорту, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, E–mail: mnatsakanov@ukr.net , https://orcid.org/0000–0001–5035–2432 .

Кущев Олексій Вікторович – молодший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: aleks.tmu@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-9056-0123

Шимчук Сергій Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машинобудування, Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018, E-mail: s.shimchuk@lntu.edu.ua , https://orcid.org/0000-0002-1293-560X

Oleksandr Stelmakh – Doctor of Technical Sciences, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the State University "Kyiv Aviation Institute", visiting professor of the Beijing Institute of Technology, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: stelmah@nau.edu.ua, https://orcid.org/0000-0002-9132-6334

Ruslan Kostyunik – Candidate of Technical Sciences, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: kostynik_rus@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-0232-9208

Rudolf Mnatsakanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Air Transport, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E–mail: mnatsakanov@ukr.net, https://orcid.org/0000–0001–5035–2432

Oleksiy Kuschev – researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E–mail: aleks.tmu@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-9056-0123

Shymchuk Serhii – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018, E-mail: s.shimchuk@lntu.edu.ua , https://orcid.org/0000-0002-1293-560X

O. STELMAKH, R. KOSTYUNIK, R. MNATSAKANOV, O. KUSCHEV, S. SHYMCHUK

MICRO-CONTAMINATION CONTROL TEST RIG AS A TOOL FOR QUALITY DIAGNOSTICS OF MINIATURE BALL BEARINGS

An evaluation of the design features, scientific and practical potential, and operational efficiency of a newly developed four-channel measuring test rig for the incoming inspection of micro-contamination in miniature and precision ball bearings intended for precision mechanical systems in aerospace and defense engineering was performed. The negative impact of foreign hard and soft microparticles on the degradation of working raceway surfaces, leading to localized ultra-high contact stresses, abrasive wear, jamming, and intense fatigue pitting, was analyzed. The implementation of an inverted kinematic configuration of the test rig, where the outer bearing ring rotates while the sensors are mounted on a stationary inner shaft, was substantiated, ensuring non-contact magnetic acceleration, exclusion of external interference, maximum sensitivity to micro-contaminants, and protection of sensors against dynamic rotational errors. The technical characteristics of synchronous four-channel data acquisition combining an optical channel for capturing rotational speed and coast-down time, a vibration channel for digital signal processing and calculation of crest factor and kurtosis, an acoustic channel based on an acoustic emission sensor and a microphone, and a force channel for precise recording of pure friction torque using the housing reaction method were described. A series of experimental comparative measurements of two batches of miniature bearings, NTN 61901ZZ/5K and FAG 6001–C–2HRS, was conducted before and after the renovation procedure. Positive results regarding the restoration of the vibroacoustic characteristics of the components using combined pulse magnetic-turbulent and ultrasonic cleaning in a nefras solvent were obtained. It was proven that the application of such a combined treatment reduces bearing vibration acceleration by 66–75%, while the coefficient of variation for the coast-down time decreases from the initial 38–42% down to 9–28%, ensuring high homogeneity of the restored batch. Confirmation of the efficiency of the free coast-down method as an independent primary tool for express diagnostics of industrial cleanliness and detection of irreversible geometric defects without involving complex spectral analysis was obtained. An evaluation of the economic effect of implementing the developed test rig at aircraft repair enterprises by automating control, recovering usable components, and preventing premature failures of navigation instruments was performed.

Key words: *incoming inspection test rig, bearing micro-contamination, pulse magnetic-turbulent cleaning, ultrasonic cleaning, testing, coefficient of variation, vibration diagnostics, bronze lapping effect, economic effect, miniature bearings, aviation hardware.*

References

1. Stelmakh O. U., Kostyunik R. E., Shymchuk S. P., Kushchev O. V. Renovation of vibration characteristics of miniature ball bearings of precision mechanical systems of aerospace and military equipment. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*. 2024. Vol. 1(22). P. 314–319. https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1374

2. Kostyunik R., Mikosianchyk O., Stelmakh A. et al. An innovative approach to non-contact cleaning of mini-ball bearings. *Journal of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 12(2). P. A10–A19. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).a2

3. Stelmakh A., Kostyunik R., Mikosianchyk O. et al. Improvement of operational parameters for precision rolling bearings by cleaning working surfaces from micro pollution of various nature. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10(1). P. A31–A40. https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a5

4. Ikhsan A., Gasnia D., Rusli M. Wear Patterns on Ball Bearings Lubricated by Grease under Different Solid Contaminants. *Tribology in Industry*. 2025. Vol. 47(2). P. 202–216. DOI: 10.24874/ti.1893.02.25.04

5. Gupta A. et al. Friction torque prediction of precision ball bearing unit for reaction wheel actuators for spacecraft applications. *Int. J. System Assurance Engineering and Management*. 2025. https://doi.org/10.1007/s13198-024-02699-9

6. Wrzochal M. Comparative analysis of the structural solutions of bearing vibration test equipment used in quality control procedures. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 125(9). P. 4047–4063. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11029-5

7. Wrzochal M. New method of metrological evaluation of industrial rolling bearing vibration measurement systems. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124. P. 587–600. https://doi.org/10.1007/s00170-022-10359-0

8. Geonea I., Dumitru N., Dumitru I. Experimental Analysis of Frictional Torque from Radial Ball Bearings. Proc. CONAT 2024 International Congress of Automotive and Transport Engineering. Springer, Cham, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77627-4_19

9. Burda E. A., Zusman G. V., Kudryavtseva I. S., Naumenko A. P. An overview of vibration analysis techniques for the fault diagnostics of rolling bearings in machinery. *Shock and Vibration*. 2022. P. 1–14. https://doi.org/10.1155/2022/6136231

10. Tiboni M., Bussola R., Remino C., Amici C. A review on vibration based condition monitoring of rotating machinery. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(3). Art. 972. https://doi.org/10.3390/app12030972

11. ISO 15242-1:2004. Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 1: Fundamentals. Geneva: ISO, 2004.

12. Kemet International Ltd. Ultrasonic cleaning solutions for the aerospace and aviation industry. Technical Report. Kemet, UK, 2024. URL: https://www.kemet.co.uk/blog/cleaning/ultrasonic-cleaning-aerospace

13. UPC Corp. How Ultrasonic Cleaning Reduces High Aerospace Labor Costs without Eliminating Jobs. Technical Article. 2024. URL: https://www.upcorp.com/blog

14. Tovatech LLC. Ultrasonic Cleaning for Aerospace and Defense: non-abrasive cleaning, micron-level particle removal. *Product Overview*. 2024. URL: https://www.tovatech.com/aerospace

15. Wu P. L., He C. L., Chang Z. et al. Theoretical calculation models and measurement of friction torque for rolling bearings: state of the art. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. Art. 435. https://doi.org/10.1007/s40430-022-03726-1

16. Tiwari M., Rath K. Effect of Surface Roughness on the Friction Moment in a Lubricated Deep Groove Ball Bearing. *Lubricants*. 2024. Vol. 12(12). Art. 443. https://doi.org/10.3390/lubricants12120443

17. Bhandare R. V. et al. Fault Diagnosis and Prediction of Remaining Useful Life (RUL) of Rolling Element Bearing: A review. Tribologia – Finnish Journal of Tribology. 2024. Vol. 41(1–2).

18. ISO 15242-1:2004. Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 1: Fundamentals. Geneva: ISO, 2004.

19. DSTU GOST 520:2014. Rolling Bearings. General Technical Specifications (GOST 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ). Kyiv: SE “UkrNDNC”, 2014. 70 p.