

Стельмах О.У.,^{1,2} Костюнік Р.Є.,¹ Шимчук С.П.,³ Кущев О.В.¹
¹ Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна
² Пекінський технологічний інститут, м. Пекін, Китай
³ Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РЕНОВАЦІЯ ВІБРОХАРАКТЕРИСТИК МІНІАТЮРНИХ ШАРИКОПІДШИПНИКІВ ПРЕЦИЗІЙНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ АВІАКОСМІЧНОЇ І ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

В статті наведено детальний аналіз існуючих діагностичних систем та визначені шляхи покращення якості оцінки віброакустичних характеристик при реновації мініатюрних та прецизійних підшипників кочення механічних систем авіакосмічної і військової техніки.

Оскільки сучасні авіакосмічні прецизійні механічні системи чи високоточні пристрої оборонного призначення, що містять рухомі та обертові частини, неможливо уявити без підшипників, які реалізують просторову фіксацію обертових роторів та сприймають основну частину статичних і динамічних зусиль, то підвищення ефективності, надійності і ресурсу, а також забезпечення безвідмовної та безпечної експлуатації цих механізмів тісно пов'язане з необхідністю якісної оцінки їх технічного стану при вхідному та міжремонтному контролі.

Дана робота базується на нових явищах і закономірностях, виявлених авторами, що попередньо експериментально доведено та теоретично обґрунтовано на розробленому та створеному на сучасному рівні обладнанні: трибокавітація, утримання мікро- та наночастинок феромагнітної та іншої природи забруднення магнітними полями, що притаманні деталям шарикопідшипника та ін.

Ключові слова: мініатюрні та прецизійні шарикопідшипники, віброакустичні характеристики, трибосистема, момент тертя, час вибігу, мікро- та наночастинок забруднення

ВСТУП

Особливістю авіаційних шарикопідшипників є їх надзвичайно висока вартість, яка у десятки разів більша за аналогічних за типорозмірами підшипників загального машинобудування. При цьому їх ресурс значно перевищує міжремонтний ресурс авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), агрегатів та прецизійних механічних систем, до складу котрих вони входять. Тому повна заміна всіх шарикопідшипників, що бракуються за критерієм «сторонні шуми» у ході технічного обслуговування та ремонту – одна з найбільш вагомих статей витрат, що несуть ремонтні та експлуатаційні підприємства та авіакомпанії-перевізники. Збитки, від не оправдано частотої та передчасної заміни авіаційних шарикопідшипників в ході планових ремонтних робіт, оцінюються від 10 до 25% вартості капітального ремонту.

Від таких важливих параметрів, як швидкодія, точність управління і позиціонування, похибка виявлення літальних апаратів та інших об'єктів у просторі, щодо протиповітряної (ППО), комплексів протиракетної (ПРО) оборони, розвідувальних БПЛА та ін., залежить стан обороноздатності держави і запобігання помилок при попередженні диверсій, що приводить до серйозних людських втрат та інфраструктурних збитків. На сьогодні найбільш ефективними є методи неруйнівного контролю, зокрема – акустична та вібро- діагностика.

Високий процент відбракування спеціальних та мініатюрних підшипників визначив пошук причин підвищеного рівня шумів і вібрації зі сторони ремонтних підприємств, а споживачі змушені закупати їх за кордоном – в Японії, Німеччині та ін. Проблему підвищеної вібрації не тільки мініатюрних, але й авіаційних шарикопідшипників намагались вирішити декілька наукових лабораторій та інститутів, у том числі й наша науково-дослідна лабораторія.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження шляхів покращення якості очищення мініатюрних та прецизійних підшипників від забруднень різного характеру та розміру з метою визначення віброакустичних характеристик прецизійних трибосистем кочення встановили надгостру потребу у якісній оцінці їх поточних експлуатаційних параметрів. На сьогодні відомо багато методів та засобів очищення деталей, вузлів, агрегатів та механічних систем у зборі, які використовуються в тому числі і для забезпечення промислової чистоти підшипників кочення [1...3].

Серед традиційних методів очищення є очищення лужними водними розчинниками [4], різноманітними розчинами та композиціями, котрі дозволяють без розбирання механізму робити очищення деталей та шарикопідшипників в процесі технічного обслуговування [5]. Також відомі методи, що базуються на технології очищення робочих поверхонь вузлів та агрегатів на механічному та гідравлічному впливі на забруднення.

Найбільш поширені та ефективні на сьогодні методи базуються на використанні ультразвукових хвиль [6], котрі в рідині викликають явище кавітації. Але навіть такі високоефективні методи в певних випадках стикаються з труднощами недостатньої якості видалення мікро- та субмікро- забруднень, особливо з тракту кочення мініатюрних шарикопідшипників. Причиною цього є одновекторний характер дії активуючих і руйнуючих забруднення полів і сил, статичність об'єкту очищення та його конструктивні особливості, що сприяє утворенню певних зон затінення робочих поверхонь елементами конструкції. Це призводить до того, що ефективно очистити шарикопідшипники без детального розбирання складно, а при використанні нерозбірних і не можливо.

Існують способи та методи [7...8], що реалізують примусове взаємне переміщення елементів конструкції підшипника при створенні в сталому потоці миючої рідині ультразвукових коливань. Примусове контактне обертання чи переміщення знижує час дії рідини на робочі поверхні, а складний механічний привод може стати джерелом надходження додаткового забруднення. Все це призводить до незначної ефективності таких пристроїв через малий переріз щілин між елементами конструкції майже всіх типів мініатюрних і прецизійних шарикопідшипників та складний профіль порожнин і взаємне перекриття робочих поверхонь через особливості їх конструкції.

Безпосередню невідмінною частинною реновації будь яких підшипників кочення є система ефективного контролю якості, та їх поточного стану, для визначення можливості їх подальшої експлуатації.

Наразі на сьогодні розроблено та створено достатньо багато різноманітних методів та засобів для оцінки технічного стану підшипників кочення та ковзання. Як правило, всі вони базуються на визначенні дефектів і несправностей, що зароджуються в процесі експлуатації, з метою проведення моніторингу їх розвитку та прогнозування планування проведення ремонтних робіт [9]. Безумовним лідером у сфері моніторингу та вібродіагностики шарикопідшипників є компанія SKF Group, Schaeffler Group, ДІАМЕХ-УКРАЇНА, ДПП ТОВ ДІАМЕХ-2000, MOS Group та компанія National Instruments. Випробувально-вимірвальна апаратура вібромоніторингу цих виробників відрізняється між собою за методиками та інформативністю, але має спільний недолік - електромеханічний привод примусового обертання вільного кільця дослідного підшипника, що є додатковим джерелом вібрацій та безпосередньо впливає на достовірність результатів вимірювань параметрів. Особливо при дослідженні мініатюрних і прецизійних шарикопідшипників саме ця похибка вносить значний вклад на коректність визначення їх віброакустичних характеристик. Зокрема, в роботах С. Jackson [10], Т. Yoshioka [11], R.L. Eshleman [12], Е. Yhland [13] та ін., [14], де основний критерій якості шарикопідшипників базується на параметрах віброшвидкості та віброприскорення, виникнення котрих пов'язують з відхиленнями макро- і мікрогеометрії поверхонь кочення, а наявність мікро-, субмікро- і наночастинок феромагнітної та іншої природи, як на поверхнях, так і на змащувальних шарах не враховується.

Використання різноманітних малошумних та гідродинамічних приводів, що входять до складу сучасних приладів віброакустичного маніторингу Anderon Meter (SUGAWARA Laboratories Inc.) і Noise and vibration tester MVH 90 E/EL (SKF Group), та зменшення фонового шуму шляхом фільтрації цифрового сигналу спеціалізованим програмним забезпеченням не дозволяють зробити однозначний висновок про ступінь забрудненості мініатюрного шарикопідшипника. Дані способи призначені для вихідного контролю готових виробів шляхом аналізу вібраційних характеристик та відбракування за показниками крутильного моменту кожного підшипника на сталій швидкості 1800 об/хв.

Проблему усунення зовнішніх механічних перешкод намагаються вирішувати застосуванням вібро- і шумопоглинаючих матеріалів з винесенням назовні головного привода [15], корпусуванням вимірвального вузла та датчиків [16], використанням магнітної підвіски та волоконно-оптичних датчиків [17]. Тому, проблема визначення критерію чистоти змащувальних шарів та поверхонь елементів і деталей мініатюрних шарикопідшипників, що входять до складу відповідальних агрегатів і прецизійних механічних систем в авіаційному та військово-промисловому будівництві, внаслідок своєї складності є та залишається актуальною.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою дослідження є розробка нових високоефективних методів та засобів реновації, як мініатюрних так і прецизійних нерозбірних шарикопідшипників, що дозволить суттєво зменшити експлуатаційні витрати на ремонт авіаційної та військової техніки.

Для реалізації мети необхідно враховувати, що, прецизійні підшипники значно більше за звичайні чутливі до несприятливих умов, таких як: перепади температур, неточності установки та наявність сторонніх мікро- і наночастинок забруднень на робочих поверхнях деталей та доріжках кочення.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Одним з методів та способів, що дозволяє суттєво підвищити ефективність видалення забруднень з підшипників є запропонований колективом авторів даної статті метод вилучення мікро- та субмікро-

ферромагнітних частинок із контактуючих поверхонь вузлів тертя, в основу якого покладено ідеї збудження та видалення цих частинок з поверхонь шляхом дії на них імпульсних електромагнітних полів в гідродинамічному потоці миючої рідини при забезпеченні примусового безконтактного обертання підшипника кочення [18].

Крім того, практично всі відомі способи очищення засновані на роботі по регламенту. Тобто, процес очищення проводиться певний встановлений виробником час, котрий в кращому випадку враховує типорозмір підшипника. При цьому не враховується ні ступінь забрудненості, ні характер та природа частинок забруднення. В деяких випадках, для контролю, високовартісні підшипники проходять окрему процедуру діагностики, часто в окремих спеціалізованих відділах і лабораторіях, щодо збільшення ресурсу та повернення агрегатів в стрій. На даний момент не відомі сучасні спеціальні системи, стенди або прилади, котрі спроможні проводити діагностику поточного стану підшипника під час його очищення та сигналізувати про завершення процесу видалення забруднень за поточними характеристиками об'єкту очищення, такі критерії та параметри фактично відсутні.

Як правило основними споживчими характеристиками, що характеризують стан підшипників кочення являються:

- шуми;
- вібрація (віброшвидкість та віброприскорення);
- момент тертя;
- час вибігу.

При цьому під час визначення віброакустичних параметрів на сучасних системах «КОМПАКС-РПП», «СП-180», «СКВ-А», «ПРОТОН-СПП», «SKF-04» використовується контактний спосіб механічного приводу обертання внутрішнього кільця дослідного шарикопідшипника, що вносить суттєву похибку в одержувані результати.

Варто відмітити, що значна кількість відомих діагностичних систем не розраховані на випробування підшипників із зовнішнім діаметром менше 100 мм і, як показав літературний та патентний пошук, практично відсутні пристрої, здатні проводити аналіз поточного стану мініатюрних і прецизійних підшипників кочення, з зовнішнім діаметром менше за 30 мм.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

За результатами детального аналізу відомих методів та діагностичних пристроїв можна зробити висновок, що практично всі вони є порівняльними. Тобто, визначення параметрів досліджуваного підшипника проводиться шляхом порівняння їх з характеристиками такого ж нового, а певні характеризуючі параметри фактично відсутні. Основним напрямком діагностики фактично є виявлення ступеня та характеру пошкодження підшипників і їх механічних дефектів, тоді як наявність забруднення жодна з відомих діагностичних систем не здатна ефективно діагностувати.

Нормативна документація [19] також фактично не регламентує жоден із необхідних параметрів, лише відбувається посилання на технічні умови, що визначає виробник, вказуючи лише діапазони частот та навантаження, на яких потрібно проводити вимірювання. Основними параметрами, які вимірюються виступають вібрація, момент тертя та (в найбільш сучасних системах) – спектри шумів. Кожна система зазвичай вимірює один або максимум декілька параметри.

При цьому практично не приділяється увага такому важливому параметру як час вільного вибігу, коли вимірюється час до повної зупинки підшипника, розігнаного до певної частоти обертання під дією зовнішнього навантаження. Аналіз віброакустичних характеристик при цьому може надати важливу інформацію стосовно стану об'єкту дослідження, особливо, щодо присутності і кількості мікро- та субмікро- забруднень.

У попередніх науково-дослідних роботах розроблено та створено дослідний зразок системи контролю, що одночасно дозволяє вимірювати окрім віброакустичних параметрів такі як момент тертя та час вільного вибігу підшипників кочення, розмір яких суттєво перевищує 30 мм. Нова концепція проведення вібродіагностування саме мініатюрних шарикопідшипників, шляхом їх безконтактного обертання за допомогою рухомого імпульсного магнітного поля, потребувала більш глибокого та всебічного дослідження процесів, що відбуваються в поверхневих шарах прецизійних деталей вузлів тертя високоточних механічних систем. Основна особливість полягає: у ефективному і якісному визначенні наявності сторонніх абразивних мікро- і субмікро- частинок ферромагнітної та іншої природи в трактах кочення від дуже малих шарикопідшипників (з внутрішнім діаметром від 1мм), до типорозмірів з зовнішнім діаметром менше 30 мм, та визначенні впливу кількості цих забруднень на експлуатаційні акустичні та вібраційні характеристики досліджуваних підшипників.

Основна ідея ґрунтується на виявлених авторами раніше невідомих явищах та закономірностях у трибосистемах кочення і нових знаннях про механізм утримання поверхнями деталей підшипників мікро- субмікро- та наночастинок забруднень, а також їх вплив на віброхарактеристики трибосистем кочення у сукупності з новими відомостями про трибокавітацію і контактну траєкторію руху тіл кочення за певними

«максимальними» діаметрами. Окрім цього, вперше запропонований безконтактний привод вільного кільця мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників, при їх акустичному та вібродіагностуванні. Експериментально встановлено, що при сталих частотах обертання шариків фактичний контакт реалізується на ділянках поверхонь, що в сукупності утворюють поверхню максимального діаметру. На основі чого висунута гіпотеза, що віброхарактеристики дослідного шарикопідшипника, на певних стандартизованих частотах обертання вільного кільця, відображають лише часткову контактну взаємодію поверхонь кільця та шариків, коли останні котяться лише ділянками, що утворюють максимальний діаметр. Зважаючи на це для аналізу акустичних та вібраційних параметрів мініатюрних підшипників кочення реалізовано кочення таким чином, щоб шарики прокочувались за максимальною кількістю можливих контактних ділянок їх усієї поверхні.

На сьогодні як ніколи стоїть питання підвищення надійності, збільшення ресурсу, відновлення працездатності та функціональної якості високовідповідальних вузлів тертя прецизійних механічних систем спецтехніки авіакосмічного цивільного і оборонного призначення.

Використання нового методу та технології дасть змогу проводити якісну оцінку поточного стану мініатюрних шарикопідшипників і, шляхом реновації їх експлуатаційних характеристик, робити рекомендації щодо ресурсу прецизійних трибовузлів кочення механічних систем в авіаремонтній, військовій, приладобудівній та підшипниковій галузях машинобудування. Це дозволить зменшити витрати і скоротити час відновлення працездатності та підвищить якість передексплуатаційної і міжремонтної підготовки авіаційної та наземної техніки, що сприяє підвищенню надійності та боездатності, з огляду на безпеку держави в даний складний військовий час.

ВИСНОВКИ

1. Створення нових технологій відновлення та ремонту є актуальним напрямком розвитку та підвищення надійності і ресурсу, забезпечення безвідмовної та безпечної експлуатації сучасної авіаційної та військової техніки.

2. Детальний аналіз існуючих способів і спеціальних пристроїв діагностування наявності мікро- та нанозабруднень мініатюрних шарикопідшипників визначив необхідність коректної та якісної оцінки технічного стану відповідальних і високонавантажених прецизійних трибосистем кочення при їх вхідному та міжремонтному контролі.

3. Проблема визначення критерію чистоти змащувальних шарів та поверхонь елементів і деталей мініатюрних шарикопідшипників, що входять до складу відповідальних агрегатів і прецизійних механічних систем в авіаційному та військово-промисловому будівництві, внаслідок своєї складності, є та залишається актуальною.

4. Застосування безконтактного приводу вільного кільця шарикопідшипників, для їх діагностики, з використанням джерела змінного магнітного поля в запропонованому новому методі досліджень потрібно, щоб усунути механічні перешкоди та отримувати стабільні і чисті вихідні сигнали з чутливих відповідних акустичних та датчиків вібрації під час вибігу.

5. Запропонована авторами ідея експериментально-теоретичного рішення при визначенні впливу мікро- та наночастинок забруднень певних фракцій на вібропараметри підшипників за результатами патентно-літературного пошуку не має аналогів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лосев А.В. Сравнительный анализ существующих методов и выбор очистки поверхностей деталей авиационных агрегатов/А.В. Лосев, А.А. Жданов, Е.Н. Сломинская // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х., ХАІ. – 2003. – Вип. 1. – С. 108–116.

2. Colin H. Simmons, Dennis E. Maguire and Neil Phelps. *Manuals of Engineering Drawing*. British and international Standards//Book. Fifth Edition – 2020.

3. Довідник SKF з технічного обслуговування підшипників, PUB SR/P7 10001/1 RU, Січень 2018., ISBN 978-91-978966-4-1.

4. Smith. George H. *Escape to aqueous cleaning. (Cleaning with alkaline aqueous solutions)* // Metall Finish. – 1991, № 9. – С. 9–11.

5. Bearing Flushing Compositions and Methods, Patent№US11021671B2, Eggen, Mark (Lake Worth, FL, US), Wooton, David L. (Bumpass, VA, US), Erdek, Paul J. (Lake Worth, FL, US), United states, 01.06.2021.

6. A.Sravan Kumarab Sankha Debba S.Paulab., *Ultrasonic-assisted abrasive micro-deburring of micromachined metallic alloys* // Journal of Manufacturing Processes Volume 66, June 2021, Pages 595-607.

7. Bearing cleaning machine, Application filed by Jiangsu Kunzhou Precision Electromechanical Co Ltd, Patent Publication of № CN113714198A, China, 30.11.2021.

8. An ultrasonic cleaning method of bearing balls and device, Application PCT/SK1998/000002 events, InventorFrench Jozef SLOVÁK, Patent Publication of № WO1998031478A1, France, 23.07.1998.

9. Сидоров В.А., Сотніков О.Л., Сушко А.Є. (2014). Стенди для вхідного контролю підшипників кочення. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (23), 225–234.

10. Jackson, C., Leader, M.E. "Rotor Critical Speed and Response Studies for Equipment Selection", Vibration Institute Proceedings, April 1979, pp. 45-50. (reprinted in Hydrocarbon Processing, November, 1979, pp. 281-284).
11. T. Yoshioka, "Detection of rolling contact sub-surface fatigue cracks using acoustic emission technique". Lubrication Engineering, Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 4, No. 4, April 1993, pp.303-308.
12. Eshleman, R.L., "ASME Flexible Rotor-Bearing System Dynamics, Part 1 - Critical Speeds and Response of Flexible Rotor Systems", ASME H-42, 1972
13. E. Yhland, "A linear theory of vibrations caused by ball bearings with form errors operating at moderate speeds". Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Tribology, Vol. 114, April 1992, pp. 348-359.
14. API RP684, "Rotordynamics Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train Torsionals, and Rotor Balancing", American Petroleum Institute, August, 2005.
15. Patent № CN102507118A. (China) CPC G01M 13/00. Luoyang LYC Bearing Co Ltd/ Medium and small-sized bearing noise vibration test system/Filing or date: 29.10.2011. Issued 14.05.2014. - Application № 2011103343334A.
16. Patent № EP4186774A1. (European Patent Office) CPC G01M 13/045. Tóth, Péter 4002 Debrecen (HU) Wireless bearing monitoring system with mobile measuring device for vehicles, agricultural and industrial machinery/Filing or date: 24.11.2021. Issued-31.05.2023. - Application № 21000338.0.
17. Patent № CN108444717A. (China) CPC G01M 13/04. Suzhou Xinting Electrical And Mechanical Technology Co Ltd., A kind of magnetic suspension bearing dynamic measurement device/ Filing or date: 15.06.2018. Issued - 24.08.2018. - Application № 201810619490.1A.
18. О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, О.В. Куцев, С.П. Шимчук. Аналіз шляхів підвищення якості очищення мініатюрних підшипників кочення для прецизійних механічних та авіакосмічних систем на ремонтному виробництві // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» – Випуск № 77. – Луцьк, 2024 – С. 62-66.
19. ДСТУ ГОСТ 520:2014 Підшипники кочення. Загальні технічні умови (ГОСТ 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ).

REFERENCES

1. Losev A.V. Sravnitel'nyi analiz sushchestvuiushchikh metodov i vubor ochystky poverkhnostei detalei avyatsionnykh ahrehatov / A.V. Losev, A.A. Zhdanov, E.N. Slomynskaia // Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia. – Kh., KhAI. – 2003. – Vyp.. 1. – S. 108–116.
2. Colin H. Simmons, Dennis E. Maguire and Neil Phelps. Manuals of Engineering Drawing . British and international Standards//Book. Fifth Edition – 2020.
3. Dovidnyk SKF z tekhnichnoho obsluhovuvannia pidshypnykiv, PUB SR/P7 10001/1 RU, Sichen 2018., ISBN 978-91-978966-4-1.
4. Smith. George H. Escape to aqueous cleaning. (Cleaning with alkaline aqueous solutions) // Metall Finish. – 1991, № 9. – С. 9–11.
5. Bearing Flushing Compositions and Methods, Patent№US11021671B2, Eggen, Mark (Lake Worth, FL, US), Wooton, David L. (Bumpass, VA, US), Erdek, Paul J. (Lake Worth, FL, US), United states, 01.06.2021.
6. A.Sravan Kumarab Sankha Debba S.Paulab., Ultrasonic-assisted abrasive micro-deburring of micromachined metallic alloys // Journal of Manufacturing Processes Volume 66, June 2021, Pages 595-607.
7. Bearing cleaning machine, Application filed by Jiangsu Kunzhou Precision Electromechanical Co ltd, Patent Publication of № CN113714198A, China, 30.11.2021.
8. An ultrasonic cleaning method of bearing balls and device, Application PCT/SK1998/000002 events, Inventor French Jozef SLOVÁK, Patent Publication of № WO1998031478A1, France, 23.07.1998.
9. Sydorov V.A., Sotnikov O.L., Sushko A.Ie. (2014). Steny dlia vkhidnoho kontroliu pidshypnykiv kochennia. Visnyk Pryazovskoho Derzhavnogo Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky, (23), 225–234.
10. Jackson, C., Leader, M.E. "Rotor Critical Speed and Response Studies for Equipment Selection", Vibration Institute Proceedings, April 1979, pp. 45-50. (reprinted in Hydrocarbon Processing, November, 1979, pp. 281-284).
11. T. Yoshioka, "Detection of rolling contact sub-surface fatigue cracks using acoustic emission technique". Lubrication Engineering, Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 4, No. 4, April 1993, pp.303-308.
12. Eshleman, R.L., "ASME Flexible Rotor-Bearing System Dynamics, Part 1 - Critical Speeds and Response of Flexible Rotor Systems", ASME H-42, 1972
13. E. Yhland, "A linear theory of vibrations caused by ball bearings with form errors operating at moderate speeds". Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Tribology, Vol. 114, April 1992, pp. 348-359.
14. API RP684, "Rotordynamics Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train Torsionals, and Rotor Balancing", American Petroleum Institute, August, 2005.
15. Patent № CN102507118A. (China) CPC G01M 13/00. Luoyang LYC Bearing Co Ltd/ Medium and small-sized bearing noise vibration test system/Filing or date: 29.10.2011. Issued 14.05.2014. - Application № 2011103343334A.

16. Patent № EP4186774A1. (European Patent Office) CPC G01M 13/045. Tóth, Péter 4002 Debrecen (HU) Wireless bearing monitoring system with mobile measuring device for vehicles, agricultural and industrial machinery/Filing or date: 24.11.2021. Issued-31.05.2023. - Application № 21000338.0.

17. Patent № CN108444717A. (China) CPC G01M 13/04. Suzhou Xinting Electrical And Mechanical Technology Co Ltd., A kind of magnetic suspension bearing dynamic measurement device/ Filing or date: 15.06.2018. Issued - 24.08.2018. - Application № 201810619490.1A.

18. O.U. Stelmakh, R.Є. Kostyunik, O.V. Kushchev, S.P. Shymchuk. Analiz shliakhiv pidvyshchennia yakosti ochyshchennia miniatiurnykh pidshypnykiv kochennia dlia pretsyziinykh mekhanichnykh ta aviakosmichnykh system na remontnomu vyrobnytstvi // Mizhvuzivskyi zbir-nyk «Naukovi notatky» – Vypusk № 77. – Lutsk, 2024 – S. 62-66.

19. DSTU HOST 520:2014 Pidshypnyky kochennia. Zahalni tekhnichni umovy (HOST 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ).

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.

The article provides a detailed analysis of existing diagnostic systems and identified ways to improve the quality of assessment of vibroacoustic characteristics during the renovation of miniature and precision rolling bearings of mechanical systems of aerospace and military equipment.

Since modern aerospace precision mechanical systems or high-precision defense devices, containing moving and rotating parts, cannot be imagined without bearings that realize spatial fixation of rotating rotors and perceive the main part of static and dynamic forces, then increasing efficiency, reliability and resource, as well as providing trouble-free and safe operation of these mechanisms is closely related to the need for qualitative assessment of their technical condition during initial and inter-repair control.

This work is based on new phenomena and regularities discovered by the authors, which were previously experimentally proven and theoretically based on the equipment developed and created at the modern level: tribocavitation, retention of micro- and nano-particles of ferromagnetic and other nature of contamination by magnetic fields inherent in ball bearing parts, etc.

Key words: miniature and precision ball bearings, vibroacoustic characteristics, tribosystem, friction moment, run-out time, micro- and nanoparticle pollution.

СТЕЛЬМАХ Олександр Устимович, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій Національного авіаційного університету, запрошений професор Пекінського технологічного інституту, e-mail: stelmah@nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9132-6334>

КОСТЮНІК Руслан Євгенович, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій Національного авіаційного університету, e-mail: kostyunik_rus@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0232-9208>

ШИМЧУК Сергій Петрович, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету, e-mail: s.shimchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1293-560X>

КУЩЕВ Олексій Вікторович, науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій Національного авіаційного університету, e-mail: stelmah@nau.edu.ua

Oleksandr STELMAKH, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the National Aviation University, visiting professor of the Beijing Institute of Technology, e-mail: stelmah@nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9132-6334>

Ruslan KOSTYUNIK, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the National Aviation University, e-mail: kostyunik_rus@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0232-9208>

Serhii SHYMCHUK, associate professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering of the Lutsk National Technical University, e-mail: s.shimchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1293-560X>

Oleksiy KUSCHEV, researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the National Aviation University, e-mail: stelmah@nau.edu.ua

DOI 10.36910/automash.v1i22.1374