

А. В. ГАЙДАМАКА, Ю. Д. МУЗИКІН, Д. Ю. БОРОДИН, І. С. ВЕРБА, С. В. КРИГІН, О. В. ІЩЕНКО

ДІАГНОСТИКА ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ПРОКАТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Проаналізовано особливості роботи підшипників ковзання прокатного обладнання. Розглянуто методи діагностики підшипників ковзання загального призначення і прокатного обладнання. Запропоновано прямий контроль гранично допустимого зносу підшипників ковзання в експлуатації. Сформульовано основні положення програми проведення консультацій з працівниками технічних служб металургійних підприємств щодо обслуговування, ремонту і експлуатації типових підшипників ковзання та ознайомлення з конструкцією, функціонуванням, налагодкою, особливостями експлуатації, обслуговування, ремонту підшипників ковзання з розробленим модулем прямого контролю зносу.

Ключові слова: підшипник ковзання; аварійна ситуація; прокатне обладнання; прямий контроль зносу; дистанційні інформаційно-консультаційні послуги

А. В. ГАЙДАМАКА, Ю. Д. МУЗЫКИН, Д. Ю. БОРОДИН, И. С. ВЕРБА, С. В. КРЫГИН, О. В. ИЩЕНКО

ДІАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕННЯ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Проанализированы особенности работы подшипников скольжения прокатного оборудования. Рассмотрены методы диагностики подшипников скольжения общего назначения и прокатного оборудования. Предложен прямой контроль предельно допустимого износа подшипников скольжения в эксплуатации. Сформулированы основные положения программы проведения консультаций с работниками технических служб металлургических предприятий относительно обслуживания, ремонта и эксплуатации типичных подшипников скольжения и ознакомления с конструкцией, функционированием, наладкой, особенностями эксплуатации, обслуживания, ремонта подшипников скольжения с разработанным модулем прямого контроля износа.

Ключевые слова: подшипник скольжения; аварийная ситуация; прокатное оборудование; прямой контроль износа; дистанционные информационно-консультационные услуги

A. GAYDAMAKA, Y. MUZIKIN, D. BORODIN, I. VERBA, S. KRIGIN, O. ISHCENKO

DIAGNOSTICS OF ROLLING EQUIPMENT SLIDING BEARINGS

Peculiarities of rolling bearings operation are analyzed. Methods of diagnostics of general purpose sliding bearings and rolling equipment are considered. Direct control of the maximum allowable wear of plain bearings during operation is proposed. It is advisable to provide remote information and consulting services to technical services of metallurgical enterprises for maintenance, repair and operation of crankshaft bearings. Bearings of electric machines of drives of rolls of rolling mills work in extremely difficult conditions with considerable overloads in the environment of the increased vibration. This leads to premature wear of the liner and its fatigue failure. The technical condition of bearings of electric machines of drives of rolls of rolling mills for the purpose of an exception of an emergency stop of production is carried out by indirect control of temperature and vibration. However, these controls do not guarantee an avoidance of an emergency. All problems with working plain bearings can be grouped into three groups: insufficient bearing capacity of the lubricating layer, unregulated clearance between the shaft and the liner, unsatisfactory technical condition of the bearing surfaces. Insufficient bearing capacity of the lubricating layer is more often associated with loss of lubricant properties due to improper maintenance of the lubrication system. The discrepancy between the size of the gap between the shaft and the liner to the normalized value arises from design, technological and operational reasons.

Key words: plain bearing; failure; rolling equipment; direct wear control; remote information and consulting services

Вступ. Підшипники електромашин приводів валків прокатних станів працюють у надважких умовах зі значними перевантаженнями у середовищі підвищеної вібрації. Це спричинює передчасне зношування вкладиша і його втомне руйнування. Технічний стан підшипників електромашин приводів валків прокатних станів з метою виключення аварійної зупинки виробництва визначається непрямым контролем температури і вібрації. Однак ці заходи контролю не гарантують уникнення аварійної ситуації. Про це свідчать, наприклад, аварії на ПАТ «Запоріжсталь» 28.06.2014, 07.08.2014 та 25.06.2016 рр. через підвищений нагрів і пошкодження підшипників. Тому існуючі методи контролю підшипників електромашин приводів валків прокатних станів потребують удосконалення і розвитку.

Аналіз літератури і постановка проблеми. Умови виходу з ладу підшипників ковзання (ПК) в експлуатації, до яких відносять недостатню несучу спроможність мастильного шару, ненормований зазор між валом і вкладишем, незадовільний технічний стан робочих поверхонь підшипника, проаналізовано в роботі [1]. Недостатня несуча спроможність мастильного шару частіше пов'язана з втратами властивостей мастила через неналежне обслугову-

вання системи змащування, а невідповідність величини зазору між валом і вкладишем нормованому значенню виникає з конструктивних, технологічних та експлуатаційних причин.

Основні види пошкоджень бабітового шару ПК, що отримані за результатами стендових випробувань при спеціальних умовах роботи і які спричинюють появу конкретного зносу, показані на рис. 1 [2].

Однак в реальних умовах експлуатації ПК, наприклад, електродвигунів вертикальних валків прокатних станів Тандем, 1680, 1700-1, 1700-2 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь», картина пошкоджень має декілька видів дефектів разом. На рис. 2 наведено фото дефектного вкладиша, знятого з експлуатації. На рис. 2 виділено характерні пошкодження: 1 – припрацювання в «чистому» мастилі; 2 – знос при забрудненні мастила сторонніми частками; 3 – заїдання при перевантаженні; 4 – руйнування від втоми при динамічному крайовому навантаженні (перекосі).

Кожний з виявлених дефектів ПК на рис. 2 (за виключенням припрацювання) є небезпечним для його функціонування. Знос при забрудненні мастила

© А. В. Гайдамака, Ю. Д. Музикін, Д. Ю. Бородин, І. С. Верба, С. В. Кригін, О. В. Іщенко, 2021

сторонніми частками погіршує умови існування мастильного клину у ПК і знижує його вантажну здатність, що сприяє подальшому зносу. Заїдання, руйнуючи поверхневий шар бабіту, утворює локальні заглибини і погіршує умови змащування робочих поверхонь. Руйнування від втоми при динамічному навантаженні – це найбільш небезпечний дефект із розглянутих видів, оскільки спричинені ним пошкодження у вигляді поверхневих сколів і зламів не

тільки погіршують умови змащування, але є причиною відділення фрагментів антифрикційного шару від вкладиша і руйнування всього підшипника. Тому технічними нормами браковки ПК прокатних станів, згідно з роботою [3], вважають наступні: знос бабіту і збільшення зазору у 2...3 рази; тріщини і сколювання бабіту; сколювання буртів. Останні два пошкодження спричинюються вібраціями через збільшені зазори.

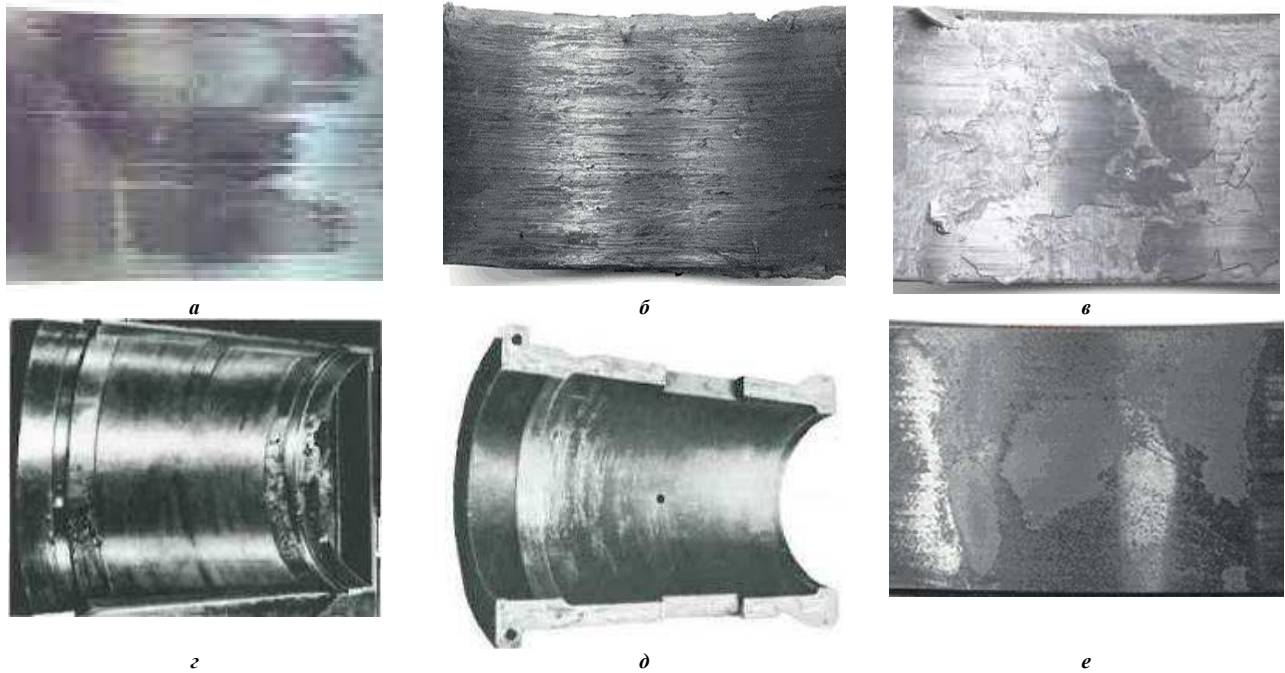


Рисунок 1 – Пошкодження бабітового шару підшипників ковзання:
 а – припрацювання; б – знос в присутності забруднення; в – заїдання при перевантаженні;
 г – втомне руйнування; д – корозія; е – кавітація

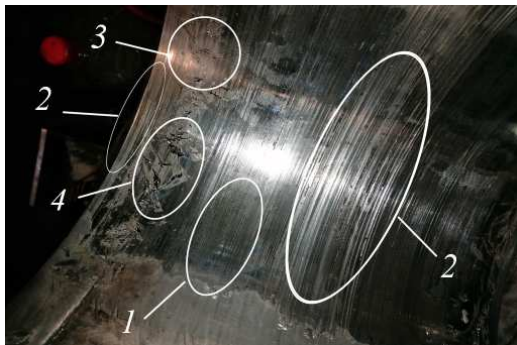


Рисунок 2 – Пошкодження підшипників ковзання електродвигунів вертикальних валків прокатних станів

Отже, найважливішою діагностичною ознакою ПК прокатних станів, яка потребує першочергового виявлення, треба вважати робочий радіальний зазор між валом і поверхнею вкладиша. Діагностика цього зазору, який збільшується при експлуатації ПК через знос бабітового вкладиша, може здійснюватися непрямою і прямими способами.

Основними видами непрямої діагностики підшипників ковзання роторних систем є: аналіз температури [4], вібрацій [5], акустики [6], мастила [7], електричного струму на двигуні [8]. Діагностику ПК прокатних станів здійснюють за температурою та

вібрацією. Контроль температури має значне запізнення і попереджує лише про поступове накопичення пошкоджень. В роботі дано порівняння різних методів діагностики ПК за вібраціями [9]. Суттєвим недоліком відомих методів діагностики за вібраціями є залежність точності оцінки технічного стану від кваліфікації діагноста, його знань про особливості конструкції і функціонування, а також природи вібраційних процесів. Крім того, як вказано в роботі [10], у підшипників ковзання взагалі слабка віброакустична активність, і діагностичний сигнал важко виділити від шуму. Тому частіше застосовують комплексну діагностику ПК за температурою, вібрацією та станом мастила [11].

Для зниження зовнішнього негативного впливу на ПК можуть бути використані спеціальні віброзахисні опори [12], підвищено ресурс різьбових з'єднань [13]. Останнім часом з'явилися публікації про можливість застосування штучного інтелекту для діагностики пошкоджень роторних систем. У роботі [14] подано огляд літератури і теоретичні основи застосування ймовірнісних, евристичних та інших методів штучного інтелекту, розглянуто їх переваги та недоліки. При цьому виявлено, що на стійкість роботи ПК з двох факторів – зазор і мастило – найбільш суттєво впливає перший [15]. Встановлення найбільш важливих якісних та кількісних

характеристик ПК для ідентифікації пошкоджень здійснено в роботі [16] на прикладі роторної системи парової турбіни шляхом розпізнавання образів. Поширення отримали методи: машинного навчання для отримання характеристик сигналів про несправності [17], за прихованими моделями Маркова [18], вибору оптимальної частотної області контрольних сигналів [19], на основі дискретного вейвліт-аналізу [20], за статистикою часу повтору сигналу [21]. Модель діагностики зносу підшипників ковзання на основі теоретичного аналізу характеристик мастильного шару пропонується в роботі [22]. Модель дозволяє діагностувати знос ПК залежно від пошкодження системи змащування, збільшення навантаження та вібрацій. Однак вказані методи та моделі діагностики роторних систем із застосуванням штучного інтелекту потребують експериментальної перевірки отриманих результатів. З урахуванням вищевказаного для підшипників ковзання більш перспективною вважають діагностику прямим способом за контролем величини зносу (робочого радіального зазору) [23].

Способи діагностики зносу (робочого радіального зазору) ПК у вітчизняній практиці найбільш розвинуті для корінних і шатунних підшипників кривошипно-шатунного механізму транспортних засобів [24]. Знос цих підшипників ковзання визначають як за зміною тиску у мастильній магістралі [25], так і за кількістю сторонніх часток у мастилі [26], але частіше за переміщенням поршня в межах зазору із застосуванням індикаторного приладу годинникового типу [27], а також пластикового щупу (пластигейджу) та на основі деформації дроту зі свинця. Останні два способи дають грубу оцінку зазорів, причому їх застосовують лише при зупиненому ПК.

На думку авторів роботи [2] особливості конструкції (розташування підшипників у подушках) та експлуатації (низька частота обертання та нестаціонарні режими роботи) підшипникових вузлів прокатних станів ускладнюють оцінку технічного стану ПК відомими методами діагностики. Визначити величини зазорів безпосередньо у шестеренній клітці практично неможливо. Тому оцінити якість виготовлення, правильність складання і підготовки до роботи, а також технічний стан після експлуатації можна тільки оглядом зношених вкладишів після демонтажу підшипників ковзання. Саме методика візуального способу діагностики ПК пропонується в роботі [28]. Такий підхід до діагностики дав можливість класифікувати пошкодження ПК, визначити причини їх появи і зробити висновки про можливість ремонту та подальшої експлуатації.

Про значну утрудненість визначення зносу (радіального робочого зазору) у підшипників ковзання прокатного обладнання відомими прямими і непрямыми методами діагностики вказується в публікації [29]. Отже, виникає необхідність застосування спеціальних пристроїв до ПК прокатного обладнання, які би в автоматичному режимі фіксували небезпечний зазор і припиняли роботу машини для запобігання аварійних ситуацій.

Спеціальні датчики зносу для діагностики пра-

цездатності підшипників ковзання описано в публікаціях [30–32]. У роботі [30] застосовано датчики вимірювання параметрів електричного імпедансу між рухомою і нерухою поверхнями ПК. Причому самий датчик розташовують всередині зношеної деталі. У роботі [31] за сигналами акустичної емісії, які реєструють п'єзодатчики, оцінюють знос ПК. Застосування способів, описаних в роботах [30, 31], стримується із причини складної електронної апаратури. У роботі [32] у антифрикційному шарі вкладиша розміщений ізолюваний дріт, який виступає в антифрикційному шарі на величину, що дорівнює граничному зносу антифрикційного шару. Однак недоліком цього способу є вибрана глибина залягання ізолюваного дроту аж до граничної величини зносу антифрикційного шару.

Отже, виникає необхідність удосконалення прямого способу вимірювання зносу (робочого радіального зазору) у підшипників ковзання прокатного обладнання в умовах експлуатації. Реалізація нового способу вимірювання зносу (робочого радіального зазору) у ПК прокатного обладнання в експлуатації потребує проведення консультацій з обслуговуючим персоналом для ознайомлення з конструкцією, функціонуванням, налагодкою, особливостями експлуатації, технічного обслуговування, ремонту ПК з розробленим модулем прямого контролю зносу.

Мета і задачі дослідження. Метою цього дослідження є виявлення ефективних шляхів діагностики підшипників ковзання, розробка прямого способу контролю зносу (робочого радіального зазору) у підшипників ковзання прокатного обладнання в умовах експлуатації і формулювання основних положень програми проведення консультацій з обслуговуючим персоналом прокатного обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати технічну літературу з діагностики підшипників ковзання загального призначення і підшипників ковзання прокатного обладнання;
- розробити спосіб прямого контролю зносу (робочого радіального зазору) у ПК прокатного обладнання в умовах експлуатації;
- сформулювати основні положення програми проведення консультацій з обслуговуючим персоналом прокатного обладнання для ознайомлення з конструкцією, функціонуванням, налагодкою, особливостями експлуатації, технічного обслуговування, ремонту ПК з розробленим модулем прямого контролю зносу.

Основна частина дослідження. Підшипниковий вузол [33] включає:

- деталі підшипників ковзання – корпус 1, вкладиш 2 з бабітом 3, вал 4;
- модуль прямого контролю зносу ПК – капсулу з провідником 5, джерело живлення 6, сигналізатор 7 (рис. 3).

ПК із запропонованим модулем контролю зносу працює наступним чином. При досягненні граничного зносу антифрикційного шару вкладиша або критичної величини зазору (провідник вбудований у бабіт на задану за вимогою споживача глибину)

починається знос ізольованого провідника 4, через який проходить електричний струм. Це спричинить замикання електричного ланцюга і включення сигнального пристрою 7 (загоряється світло чи включається звуковий сигнал), що свідчить про необхідність припинення роботи підшипників ковзання для заміни вкладиша. Замінений вкладиш разом з новим провід-

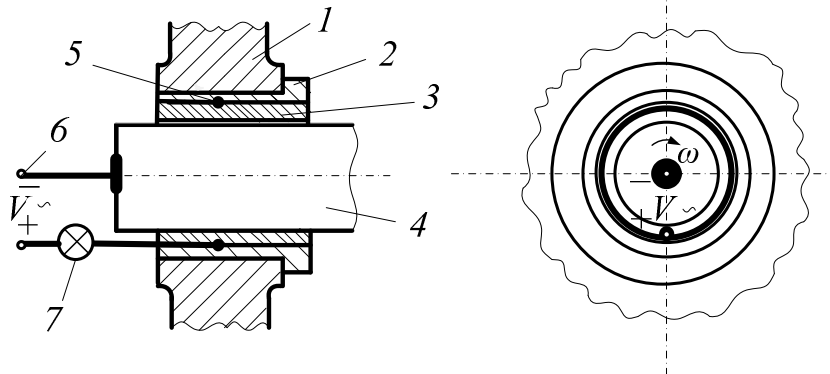


Рисунок 3 – Підшипниковий вузол з модулем прямого контролю зносу

З метою ознайомлення з конструкцією, функціонуванням, налагодкою, особливостями експлуатації, технічного обслуговування, поточного ремонту ПК з розробленим модулем прямого контролю зносу пропонується надання інформаційно-консультаційних послуг технічним службам металургійних підприємств. Основними задачами інформаційно-консультаційних послуг є:

1. *визначення особливостей експлуатації прокатного обладнання*, де буде проаналізовано складний кінематичний ланцюг приводу робочої кліті, в якій силові та кінематичні збурення з випадковими параметрами сприймаються опорами ковзання. Показано, що відомий нормативний непрямий контроль технічного стану ПК за вібраціями та температурою не гарантує безпечну експлуатацію;

2. *визначення особливостей експлуатації та технічного обслуговування ПК прокатного обладнання*, де буде проаналізовано перехідні нестійкі режими роботи та причини передчасного виходу з ладу. Показано, що підвищені вібрації можуть бути зумовлені як змінами в самому підшипнику (зносом), так і зовнішнім впливом механічних систем прокатного обладнання. Погіршення технічного стану мастила пов'язано з процесами старіння, наявністю сторонніх часток та вологи. Порушення центрування валу частіше з'являється через деформації фундаментних конструкцій, неточності монтажу, дефекти з'єднувальних муфт, перевантаження ПК. Найважливіша операція технічного контролю ПК – це регулярні нормативні ревізії;

3. *ознайомлення з відомими конструкціями ПК та матеріалами вкладишів*, де буде дана класифікація ПК, показано основні типи конструкцій ПК та види антифрикційних матеріалів. Умови функціонування ПК розглянуто з позицій рідинного тертя і з урахуванням макро- та мікрогеометрії поверхонь. Для відомих матеріалів вкладишів проаналізовано допустимі режими роботи ПК;

4. *встановлення причин появи пошкоджень ПК*

у випадках зносу припрацювання, зносу з абразивом, корозії, кавітації, заїдання, втомного руйнування. Встановлено, що у ПК прокатного обладнання зустрічаються знос припрацювання, зносу з абразивом, заїдання, втомне руйнування. Показано, що найбільш небезпечними пошкодженнями є заїдання і втомне руйнування, які виникають через перевантаження і перекоси ПК. Перевантаження ПК пов'язані з нештатними режимами роботи прокатного обладнання, а перекоси ПК можуть бути викликані помилками монтажу і розцентрування валів;

5. *аналіз шляхів підвищення надійності ПК* – конструктивного, технологічного, експлуатаційного. Основна увага приділяється першому і третьому напрямкам як найбільш перспективним. Конструктивні міри реалізують за рахунок удосконалення конструкцій ущільнень вузлів, застосування засобів контролю зносу. Експлуатаційні міри повинні включати контроль монтажу вузла, вібрацій, температури та стану мастила.

6. *презентація конструкції і функціонування розробленого ПК з модулем прямого контролю зносу*. Роз'яснено конструктивні особливості і особливості функціонування підшипникового вузла з модулем прямого контролю зносу. На лабораторному стенді випробування ПК змодельовано умови роботи ПК електродвигунів приводів вертикальних валків прокатних станів і продемонстровано функціонування розробленого ПК з модулем прямого контролю зносу в прискореному режимі роботи на фінішній стадії зношування.

7. *основні підсумкові рекомендації* поділено на невідкладні і перспективні заходи підвищення надійності ПК механічних систем прокатного обладнання. До невідкладних заходів, які реалізуються обслуговуючим персоналом підприємства, віднесено посилення контролю вібрацій, центрування валу, стану мастила. До перспективних заходів, які можуть бути виконані в ході дослідних робіт, віднесено застосування обладнання контролю мастила і стабі-

лізації режимів змащування, виявлення причин підвищених вібрацій підшипникових вузлів, впровадження способу прямого контролю зносу ПК.

Висновки.

1. Особливості конструкції та експлуатації підшипникових вузлів прокатного обладнання не дозволяють натеper адекватно оцінити технічний стан ПК відомими способами діагностики. Вказане потребує розробки спеціального методу контролю зносу (робочого радіального зазору) ПК прокатного обладнання в процесі експлуатації.

2. Пристрій прямого контролю зносу (робочого радіального зазору) ПК вигідно відрізняється від відомих технічних рішень своєю простотою конструкції без втручання в технологічний процес роботи машини, надійністю і точністю контролю та відносно низькими затратами на його реалізацію безпосередньо в експлуатації.

3. Визначено доцільним надання інформаційно-консультаційних послуг технічним службам металургійних підприємств щодо обслуговування, ремонту і експлуатації підшипників ковзання з пристроєм прямого контролю зносу в процесі експлуатації прокатного обладнання.

Список літератури

- Sovilj-Nikić S., Sovilj B., Varga G., Antunović R., Ungureanu N. Analysis of tribological damages of plain bearings. *Annual Session of Scientific Papers "IMT ORADEA 2019" IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019.
- Повреждения подшипников скольжения. *MS Motorservice International GmbH*. 2017. 72 с.
- Сидоров В.А., Сидоров А.В. Устранение повреждения подшипников скольжения шестеренных клетей. *Главный механик*. 2019. №9. С. 16–26.
- Osornio-Rios R., Antonino-Daviu J., Romero-Troncoso R. Recent industrial applications of infrared thermography: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018, vol. 15, pp. 615–625.
- He C., Li H., Li Z., Zhao X. An improved bistable stochastic resonance and its application on weak fault characteristic identification of centrifugal compressor blades. *Journal of Sound and Vibration*. 2019, vol. 442, pp. 677–697.
- Glowacz A. Recognition of acoustic signals of loaded synchronous motor using FFT, MSAF-5 and LSVM. *Archives of Acoustics*. 2015, vol. 40, pp. 197–203.
- Yan X., Xu X., Sheng C., Yuan C., Li Z. Intelligent wear mode identification system for marine diesel engines based on multi-level belief rule base methodology. *Measurement Science and Technology*. 2017, vol. 29, pp. 1–13.
- Junyeong J. Monitoring Journal-Bearing Faults: Making Use of Motor Current Signature Analysis for Induction Motors. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 12–21.
- Ooijsaar T., Pichler K., Di Y., Hesch C. A Comparison of Vibration based Bearing Fault Diagnostic Methods. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1–17.
- Ишметьев Е. Н., Панов А. Н., Романенко А.В., Васильев Е. Ю., Коробейников С.М. Применение виброконтроля в прокатном производстве. *Уральский промышленник*. 2014. №1. С. 27–32.
- Ranjan R., Ghosh S., Kumar M. Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: A case study. *Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020, vol. 234, no. 3, pp. 235–242.
- Klitnoi, V., Gaydamaka, A.: On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness. *Diagnostyka*. 2020. vol. 21(2), pp. 69–75.
- Gaydamaka A., Muzikin Y., Klitnoi V., Basova Y., Dobrotvorskiy S. Selecting the Method for Pre-tightening Threaded Connections of Heavy Engineering. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2021*. 2021. pp. 69–77.
- Liu R., Yang B., Zio E., Chen X. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018, vol. 108, pp. 33–47.
- Visnadi L., Castro H. Influence of bearing clearance and oil temperature uncertainties on the stability threshold of cylindrical journal bearings. *Mechanism and Machine Theory*. 2019, vol. 134, pp. 57–73.
- Pino Gómez J., Hernández Montero F., Gómez Mancilla J. Variable Selection for Journal Bearing Faults Diagnostic Through Logical Combinatorial Pattern Recognition. *In Lecture Notes in Computer Science: Springer*, 2018.
- Martin-del-Campo S., Sandin F. Online feature learning for condition monitoring of rotating machinery. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2017, vol. 64, pp. 187–196.
- Geramifard O., Xu J., Panda S. Fault detection and diagnosis in synchronous motors using hidden Markov model-based semi-nonparametric approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2013, vol. 26, pp. 1919–1929.
- Li K.; Chen P.; Wang H. Intelligent diagnosis method for rotating machinery using wavelet transform and ant colony optimization. *IEEE Sensors Journal*. 2012, vol. 12, pp. 2474–2484.
- Cruz-Vega I., Rangel-Magdaleno J., Ramirez-Cortes J., Peregrina-Barreto H. Automatic progressive damage detection of rotor bar in induction motor using vibration analysis and multiple classifiers. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017, vol. 31, pp. 2651–2662.
- Martinez-Rego, D.; Fontenla-Romero, O.; Alonso-Betanzos, A.; Principe, J.C. Fault detection via recurrence time statistics and one-class classification. *Pattern Recognition Letters*. 2016, vol. 84, pp. 8–14.
- Guo J., Zheng W., Han Y., Zhu L., Che Y., Wang J., Wang M. Diagnostic method and application of low speed sliding bearing wear fault. / *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020.
- Доценко В. Н., Навальнев Н. И. Определение работоспособности подшипника скольжения на основе контактного взаимодействия ротора и вкладыша. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. № 4. С. 41–44.
- Глемба К.В., Гриценко А.В., Ларин О.Н. Диагностирование коренных и шатунных подшипников кривошипно-шатунного механизма. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2014, том 14, № 1. С. 63–71.
- Пат. 2560972 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/00. Способ безразборной диагностики степени износа подшипников двигателя внутреннего сгорания / А.А. Макушин, О.А. Кулаков, А.Т. Кулаков, Е.П. Барыльникова, А.А. Гафиятуллин. № 2013120821/06; заявл. 06.05.13; опубл. 20.08.15, Бюл. № 23.
- Пат. РФ 2369852, МПК G01M13/04. Способ определения износа подшипников скольжения / Гамей А. И., Никифоров Б. А., Бурлаков С. М., Постников С.Ф., Огарков Н.Н., Сорокина И.А., Сорокин А.М., Черязов А.Г. Опубл. 10.10.2009.
- Пат. 2739657 Российская Федерация, МПК G01B 13/12, G01M 15/06. Способ эксплуатационного контроля зазора в шатунных подшипниках коленчатого вала при диагностике двигателя внутреннего сгорания автомобилей, транспортных и транспортно-технологических машин / Макушин А.А., Кулаков, А.Т., Нуретдинов Д.И., Кулаков О.А., Мухаметдинов Э.М., Гафиятуллин А.А., Казанцев Р.А. 2020109944; заявл. 10.03.2020; опубл. 28.12.2020, Бюл. № 1.
- Branagan L. Survey of Damage Investigation of Babbitted Industrial Bearings. *Lubricants*. 2015, vol. 3, pp. 91–112.
- Крот П.В. Анализ результатов исследований в области динамики и диагностики оборудования прокатных станов. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.*

- научн. тр. Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України, 2006. Вип. 12. С. 298–310.
30. US 2014/0103942 A1. Sensor for wear measurement, method of making, and method of operating same. / I. Izrailit, L. Carnahan, A. Drew, R. Soelch. Pub. Date: Apr. 17, 2014.
 31. Пат. РФ 2212648 С2, МПК G 01 N 3/56, 29/14. *Способ определения износа вкладыша подшипника скольжения* / Фадин Ю.А., Булатов В.П., Киреенко О.Ф., Тулаев В.И. Оpubл. 20.09.2003.
 32. Пат. РФ 2398142, МПК F16C 17/02, F16C 17/24, F16C 33/04, G01M 13/04. *Мехатронный подшипник скольжения* / Савин Л. А., Поляков Р. Н. Оpubл. 27.08.2010.
 33. Пат. України 147233, МПК F16C 17/02, F16C 17/24, F16C 33/04. *Мехатронний підшипник ковзання* / Гайдамака А.В., Музикін Ю.Д., Татков В.В., Бородін Д.Ю. Оpubл. 21.04.2021.
- References (transliterated)**
1. Sovilj-Nikić S., Sovilj B., Varga G., Antunović R., Ungureanu N. Analysis of tribological damages of plain bearings. *Annual Session of Scientific Papers "IMT ORADEA 2019" IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019.
 2. *Povrezhdeniya podshipnikov skol'zheniya*. MS Motorservice International GmbH. 2017. 72 p.
 3. Sidorov V.A., Sidorov A.V. Ustranenie povrezhdeniya podshipnikov skol'zheniya shesterenny'kh kletej. *Glavny'j mekhanik*. 2019. #9. С. 16–26. Osornio-Rios R., Antonino-Daviu J., Romero-Troncoso R. Recent industrial applications of infrared thermography: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018, vol. 15, pp. 615–625.
 4. Osornio-Rios R., Antonino-Daviu J., Romero-Troncoso R. Recent industrial applications of infrared thermography: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018, vol. 15, pp. 615–625.
 5. He C., Li H., Li Z., Zhao X. An improved bistable stochastic resonance and its application on weak fault characteristic identification of centrifugal compressor blades. *Journal of Sound and Vibration*. 2019, vol. 442, pp. 677–697.
 6. Glowacz A. Recognition of acoustic signals of loaded synchronous motor using FFT, MSAF-5 and LSVM. *Archives of Acoustics*. 2015, vol. 40, pp. 197–203.
 7. Yan X., Xu X., Sheng C., Yuan C., Li Z. Intelligent wear mode identification system for marine diesel engines based on multi-level belief rule base methodology. *Measurement Science and Technology*. 2017, vol. 29, pp. 1–13.
 8. Junyeong J. Monitoring Journal-Bearing Faults: Making Use of Motor Current Signature Analysis for Induction Motors. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 12–21.
 9. Ooijevaar T., Pichler K., Di Y., Hesch C. A Comparison of Vibration based Bearing Fault Diagnostic Methods. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1–17.
 10. Ishmet'ev E. N., Panov A. N., Pomanenko A.V., Vasil'ev E. Yu., Korobejnikov S.M. Primenenie vibrokontrolya v prokatnom proizvodstve. *Ural'skij promy'shlennik*. 2014, no. 1, pp. 27–32.
 11. Ranjan R., Ghosh S., Kumar M. Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: A case study. *Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020, vol. 234, no. 3, pp. 235–242.
 12. Klitnoi, V., Gaydamaka, A.: On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness. *Diagnostyka*. 2020. vol. 21(2), pp. 69–75.
 13. Gaydamaka A., Muzikin Y., Klitnoi V., Basova Y., Dobrotvorskij S. Selecting the Method for Pre-tightening Threaded Connections of Heavy Engineering. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2021*. 2021. pp. 69–77.
 14. Liu R., Yang B., Zio E., Chen X. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018, vol. 108, pp. 33–47.
 15. Visnadi L. Castro H. Influence of bearing clearance and oil temperature uncertainties on the stability threshold of cylindrical journal bearings. *Mechanism and Machine Theory*. 2019, vol. 134, pp. 57–73.
 16. Pino Gómez J., Hernández Montero F., Gómez Mancilla J. Variable Selection for Journal Bearing Faults Diagnostic Through Logical Combinatorial Pattern Recognition. *In Lecture Notes in Computer Science*: Springer, 2018.
 17. Martin-del-Campo S., Sandin F. Online feature learning for condition monitoring of rotating machinery. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2017, vol. 64, pp. 187–196.
 18. Geramifard O., Xu J., Panda S. Fault detection and diagnosis in synchronous motors using hidden Markov model-based semi-nonparametric approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2013, vol. 26, pp. 1919–1929.
 19. Li K.; Chen P.; Wang H. Intelligent diagnosis method for rotating machinery using wavelet transform and ant colony optimization. *IEEE Sensors Journal*. 2012, vol. 12, pp. 2474–2484.
 20. Cruz-Vega I., Rangel-Magdaleno J., Ramirez-Cortes J. Peregrina-Barreto H. Automatic progressive damage detection of rotor bar in induction motor using vibration analysis and multiple classifiers. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017, vol. 31, pp. 2651–2662.
 21. Martinez-Rego, D.; Fontenla-Romero, O.; Alonso-Betanzos, A.; Principe, J.C. Fault detection via recurrence time statistics and one-class classification. *Pattern Recognition Letters*. 2016, vol. 84, pp. 8–14.
 22. Guo J., Zheng W., Han Y., Zhu L., Che Y., Wang J., Wang M. Diagnostic method and application of low speed sliding bearing wear fault. / *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020.
 23. Doczenko V. N., Naval'nev N. I. Opredelenie rabotosposobnosti podshipnika skol'zheniya na osnove kontaktnogo vzaimodejstviya rotora i vklady'sha. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij kontrol'*. 2018, no. 4, pp. 41–44.
 24. Glemba K.V., Griczenko A.V., Larin O.N. Diagnostirovanie korenny'kh i shatunny'kh podshipnikov krivoshipno-shatunnogo mekhanizma. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroeniye»*. 2014, vol. 14, no. 1, pp. 63–71.
 25. Pat. 2560972 Rossijskaya Federacziya, MPK G 01 M 15/00. *Sposob bezrazbornoj diagnostiki stepeni iznosa podshipnikov dvigatelya vnutrennego sgoraniya* / A.A. Makushin, O.A. Kulakov, A.T. Kulakov, E.P. Bary'nikova, A.A. Gafiyatullin. no. 2013120821/06; zayavl. 06.05.13; opubl. 20.08.15, Byul. no. 23.
 26. Pat. RF 2369852, MPK G01M13/04. *Sposob opredeleniya iznosa podshipnikov skol'zheniya*/ Gameja I., Nikiforov B. A., Burlakov S. M., Postnikov S.F., Ogarkov N.N., Sorokina I.A., Sorokin A.M., Cheryazov A.G. Opubl. 10.10.2009.
 27. Pat. 2739657 Rossijskaya Federacziya, MPK G01B 13/12, G01M 15/06. *Sposob e'kspluatacionnogo kontrolya zazorov v shatunny'kh podshipnikakh kolenchatogo vala pri diagnostike dvigatelya vnutrennego sgoraniya avtomobilej, transportny'kh i transportno-tehnologicheskikh mashin* / Makushin A.A., Kulakov A.T., Nuretdinov D.I., Kulakov O.A., Mukhametdinov E' M. Gafiyatullin A.A., Kazanczev R.A. 2020109944; zayavl. 10.03.2020; opubl. 28.12.2020, Byul. no. 1. Branagan L. Survey of Damage Investigation of Babbitted Industrial Bearings. *Lubricants*. 2015, vol. 3, pp. 91–112.
 28. Krot P.V. Analiz rezul'tatov issledovanij v oblasti dinamiki i diagnostiki oborudovaniya prokatny'kh stanov. *Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy' chernoj metallurgii: Sb. nauchn. tr. Dni'propetrovs'k: IChM NAN Ukraini*, 2006, vol. 12, pp. 298–310. US 2014/0103942 A1. Sensor for wear measurement, method of making, and method of operating same. / I. Izrailit, L. Carnahan, A. Drew, R. Soelch. Pub. Date: Apr. 17, 2014.
 29. Pat. RF 2212648 S2, MPK G 01 N 3/56, 29/14. *Sposob opredeleniya iznosa vklady'sha podshipnika skol'zheniya* / Fadin Yu.A., Bulatov V.P., Kireenko O.F., Tulaev V.I. Opubl. 20.09.2003.
 30. Pat. RF 2398142, MPK F16C 17/02, F16C 17/24, F16C 33/04, G01M 13/04. *Mekhatronny'j podshipnik skol'zheniya* / Savin L. A., Polyakov R. N. Opubl. 27.08.2010.
 31. Pat. Ukrainy 147233, MPK F16C 17/02, F16C 17/24, F16C 33/04. *Mekhatronny'j pidshy'pny'k kovzannya* / Gajdamaka A.V., Muzy'kin Yu.D., Tat'kov V.V., Borodin D.Yu. Opubl. 21.04.2021.

32. Pat. RF 2398142, MPK F16C 17/02, F16C 17/24, F16C 33/04, G01M 13/04. *Mexatronnyj podshy'pny'k skol'zheny'ya* / Savy'n L. A., Polyakov R. N. Opubl. 27.08.2010.
33. Pat. Ukrayiny` 147233, MPK F16C 17/02, F16C 17/24, F16C 33/04. *Mexatronny'j pidshy'pny'k kovzannya* / Gajdamaka A.V.,

Muzy`kin Yu.D., Tat`kov V.V., Borodin D.Yu. Opubl. 21.04.2021.

Надійшла (received) 02.05.2021

Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

Гайдамака Анатолій Володимирович (Гайдамака Анатолий Владимирович, Gaydamaka Anatoly) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор, завідувач кафедрою «Деталі машин та мехатронних систем», м. Харків, Україна; тел. +38-057-297-14-40; e-mail: gaydamaka.doc@gmail.com

Музикін Юрій Дмитрович (Музыкин Юрий Дмитриевич, Muzykin Yuri) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Деталі машин та мехатронних систем», м. Харків, Україна; тел. +38-067-264-56-78; e-mail: muzykin1940@mail.ru

Бородін Дмитро Юрійович (Бородин Дмитрий Юрьевич, Borodin Dmytro) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Деталі машин та мехатронних систем», м. Харків, Україна; тел. +38-067-723-20-33; e-mail: dimitriy.graf@gmail.com

Верба Ілля Сергійович (Верба Илья Сергеевич, Verba Ilya) – приватне акціонерне товариство «Запоріжсталь»; м. Запоріжжя, Україна; tel. +38-095-611-0269; e-mail: ilya.verba@zaporizhstal.com

Кригін Сергій Володимирович (Крыгин Сергей Владимирович, Krigin Sergij) – приватне акціонерне товариство «Запоріжсталь»; м. Запоріжжя, Україна; тел. +38-095-611-0269; e-mail: sergey.krygin@zaporizhstal.com

Іщенко Олександр Вікторович (Ищенко Александр Викторович, Ishchenko Oleksandr) – приватне акціонерне товариство «Запоріжсталь»; м. Запоріжжя, Україна; тел. +38-067-723-20-33; e-mail: dimitriy.graf@gmail.com