

ЛИТВИНОВ ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-9540-0327>e-mail: sdialexandr@gmail.com**ДИХА ОЛЕКСАНДР**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3020-9625>e-mail: tribosenator@gmail.com

ВІБРОДІАГНОСТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті піднімається питання проблематики вимірювання та аналізу вібраційних характеристик механічних систем без їх розбирання. Це дозволить оцінювати технічний стан об'єкта, виявляти можливі дефекти та проводити діагностику на основі вібраційних параметрів. Особливу увагу приділено вимірюванню вібрацій у вузлах тертя машин, оскільки їхній стан значною мірою впливає на роботу механізмів та загальну надійність обладнання. Основними вимогами до системи є точність вимірювань, можливість автоматизованого збору та обробки даних, а також зручність подальшого аналізу. Проведено огляд традиційних засобів та методів дослідження вібросигналів. Запропонована методика, яка базується на використанні вібраційного датчика, цифрового осцилографа та програмного середовища LabVIEW. Отримані сигнали передаються на осцилограф, де здійснюється їх реєстрація, після чого вони обробляються у LabVIEW. Реалізовано автоматизований процес збору даних, який включає фільтрацію шумів, спектральний аналіз та збереження результатів у файл.

Ключові слова: вібродіагностика, вібрація, вузли тертя, аналіз сигналів, LabVIEW.

DYKHA ALEKSANDR, LITVYN OV OLEKSANDR

Khmelnitsky National University

VIBRATION DIAGNOSTIC SYSTEM FOR STUDYING TRIBOLOGICAL PROCESSES

The article addresses the issue of measuring and analyzing the vibration characteristics of mechanical systems without disassembly. Vibration diagnostics is one of the key methods for monitoring the technical condition of mechanisms, allowing for the timely detection of potential malfunctions and preventing serious failures. This approach helps reduce maintenance costs and extend the service life of equipment. Vibration measurements make it possible to assess the wear level of components, detect clearances, imbalances, bearing damage, and gear defects.

One of the important aspects of the study is the analysis of vibrations in friction units of machines, as their condition significantly affects the overall reliability and efficiency of mechanisms. It is in friction units that problems most often arise due to wear, insufficient lubrication, or changes in the geometric parameters of parts. Regular monitoring of vibration characteristics in these elements enables the timely detection of potential failures, preventing excessive overheating, energy losses, and a decrease in system efficiency.

The main requirements for a measurement system include high accuracy, stability of readings, and the ability to automate data collection, processing, and storage. Therefore, a review of traditional tools and methods for studying vibration signals used in industrial diagnostics and scientific research has been conducted. The proposed methodology is based on the use of a highly sensitive vibration sensor, a digital oscilloscope, and the LabVIEW software environment.

The acquired signals are transmitted to the oscilloscope, where they are recorded in real time. After that, the data is processed in LabVIEW, where an automated information collection process is implemented. The software allows for noise filtering, spectral analysis, harmonic detection, and the identification of abnormal oscillations. Additionally, a function for saving the obtained results to a file has been implemented, ensuring the possibility of further detailed analysis.

This approach can significantly improve the efficiency of technical maintenance and diagnostics of mechanisms, minimize the risk of failures, and reduce repair costs. It can be useful in various industries, including mechanical engineering, energy, transportation, and aviation.

Keywords: vibration diagnostics, vibration, friction units, signal analysis, LabVIEW.

Постановка проблеми у загальному вигляді та

її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Машини широко використовуються в сучасній промисловості й відіграють ключову роль у забезпеченні роботи заводів. Регулярний моніторинг стану обладнання є критично важливим, оскільки раптові поломки можуть спричинити значні фінансові втрати для підприємства. Запобігти таким ситуаціям дозволяє діагностика, яка визначає несправності чи потенційні проблеми, такі як дисбаланс, зношування, незбіг осей, дефекти підшипників, вібраційні коливання та тріщини зубчастих передач.

Особливо важливим є вимірювання вібрацій у вузлах тертя машин, оскільки саме ці елементи зазнають найбільшого механічного навантаження та зношування. Контроль вібраційних характеристик дозволяє виявити зміни у структурі поверхонь, недостатнє або надмірне змащення, а також початкові стадії зношування деталей. Вібраційна діагностика вузлів тертя базується на аналізі амплітуди, частоти та фази сигналів, що дає змогу точно оцінити стан поверхонь тертя. Вчасне виявлення аномальних вібрацій дозволяє уникнути критичних відмов і продовжити термін служби обладнання. Таким чином, застосування вібраційного аналізу у вузлах тертя є ефективним способом підвищення надійності машин та зменшення витрат на ремонт.

Протягом останніх років було розроблено й застосовано декілька методів діагностики, зокрема аналіз мастильних матеріалів, вібраційних сигналів, частинок, корозії, акустичних сигналів та зношених

елементів. Серед них аналіз акустичних і вібраційних сигналів виділяється своєю популярністю, оскільки він дозволяє ідентифікувати більшість несправностей без зупинки обладнання або його розбирання. Зміни у вібраційних і акустичних сигналах часто вказують на наявність несправності.

Вібраційний аналіз вважається найкращим методом для визначення стану машин. За даними більше 82% діагностичних досліджень виконуються за допомогою цього методу [1]. Більшість машин складається з рухомих елементів, які створюють небажані вібрації. Вібраційний аналіз дозволяє визначити, чи може машина продовжувати роботу, чи її необхідно зупинити для ремонту. Стан машини визначається за амплітудою та частотою вібрацій, які вказують на серйозність і джерело проблеми відповідно.

Виклад основного матеріалу

Методи збору даних. Збір даних може виконувати підготовлений працівник без академічної кваліфікації, але обробка даних для визначення стану машини потребує залучення інженера. Як показано на рис. 1, у процесі збору даних важливими є два інструменти: аналізатор та датчик.

Аналізатори вібрації поділяються на автономні та комп'ютеризовані, а датчики вібрації включають акселерометри, датчики швидкості, датчики переміщення та лазерні віброметри Доплера (LDV). Акселерометри, у свою чергу, поділяються на п'єзoeлектричні та акселерометри мікроелектромеханічних систем (MEMS).

Аналізатор – це інструмент, який використовується для аналізу даних вібрації, що створюються машинами. Він включає датчик (детальніше розглянутий у наступних розділах), підсилювач, фільтр та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Сигнал від датчика вібрації спочатку підсилюється для покращення роздільної здатності та збільшення співвідношення сигнал/шум. Потім він проходить через фільтр, який запобігає ефекту накладання під час оцифрування. Після цього сигнал перетворюється в цифровий формат за допомогою АЦП і обробляється обчислювальним блоком, де його можна представити у вигляді часової діаграми або спектра частот [2].

Аналізатори вібрації поділяються на традиційні та комп'ютеризовані.

Традиційний аналізатор вібрації це автономний пристрій, спеціально створений для аналізу вібрацій. Він є складним і дорогим інструментом, який зазвичай використовується експертами з вібрацій. Такий прилад дозволяє користувачу визначити наявність проблеми, її першопричину та час, коли машина може вийти з ладу.

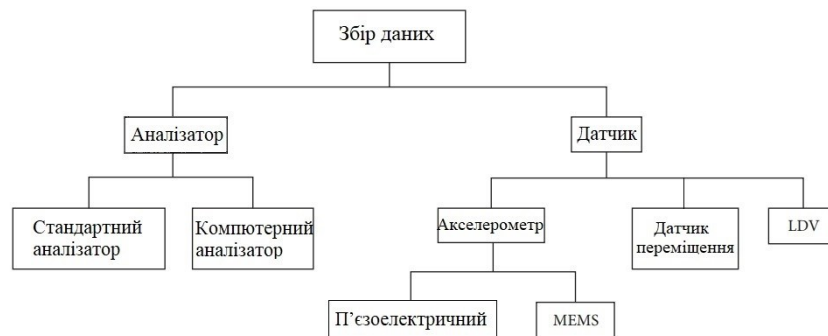


Рис. 1. Збір даних

Альтернативою є портативний віброметр. Це пристрій на батарейках, оснащений акселерометром, який відображає рівень вібрацій при контакті з машиною [3]. Він простий у використанні, але має обмежені можливості вимірювання та недостатню продуктивність для збереження даних.

Комп'ютеризований аналізатор вібрації це новий тип приладу, де дані вібрації аналізуються основі відповідних програмних засобів та персонального комп'ютера. Цей метод досить поширений через його простоту, невисоку вартість, легкість ремонту та здатність виконувати більшість функцій традиційного аналізатора, таких як осцилограф, мультиметр та генератор хвилових форм.

LabVIEW є широко використовуваною мовою програмування для цього методу завдяки великій кількості карт збору даних і вимірювальних систем, які підтримуються [4]. Досліди показують що використання комп'ютеризованого аналізатора для моніторингу стану машини є швидшим і точнішим.

Для складних задач використовуються спеціальні апаратні засоби, такі як цифровий сигнальний процесор (DSP) або програмований користувачем вентильний масив (FPGA), які працюють у поєднанні з комп'ютером і датчиком для управління та відображення результатів [2].

Комп'ютерний процесор зазвичай повинен обробляти всю операційну систему разом із віртуальним аналізатором, тоді як DSP виконує лише одне завдання, що пришвидшує аналіз вібрацій.у комп'ютері, оснащеному DSP.[5]

Види датчиків та їх застосування. Датчик або перетворювач — це пристрій, що перетворює механічні сигнали на електричні [6]. Тип датчика зазвичай залежить від частотного діапазону, чутливості, конструкції та експлуатаційних обмежень. Незалежно від типу датчика, жорсткості

кріплення датчика безпосередньо впливає на його частотний діапазон та точність вимірювань [7]. У вібраційному аналізі широко використовуються три типи датчиків для збору сигналів вібрації: акселерометр, датчик швидкості та датчик зміщення. Також розглядається безконтактний лазерний доплерівський віброметр (LDV).

Правильний вибір та реалізація методу кріплення є важливим фактором у зборі даних про вібрацію. Для безперервного або онлайн-моніторингу стану машини датчики зазвичай встановлюють стаціонарно у визначеному місці на машині. Основні методи кріплення включають: кріплення на шпильках, клеєве кріплення, магнітне кріплення та безконтактне кріплення.

Для вібродіагностики використовують декілька типів датчиків:

Акселерометр — це пристрій для вимірювання вібрації або прискорення у структурі з одиницями вимірювання в g (m/s^2). Його механізм роботи базується на ефекті п'єзоелектричних матеріалів, які при дії сили генерують заряд, пропорційний прикладеній силі. Одновісний акселерометр реєструє рух лише в одній площині, тоді як тривісний охоплює всі три напрямки. Тривісний акселерометр має більший обсяг пам'яті, але є значно дорожчим [8].

MEMS-акселерометр складається з рухомої маси з пластинами, що підтримуються механічною системою підвіски [9]. Він підходить для вимірювання низькочастотної вібрації, має низьке енергоспоживання та високу чутливість. Проте MEMS-акселерометр має погане співвідношення сигнал/шум.

Датчик зміщення, який іноді називають вихровим або датчиком наближення, вимірює як відносну вібрацію, так і положення вала. Одиницями вимірювання можуть бути м, см або мм. Зазвичай він використовується для вимірювання низькочастотної вібрації (менше 10 Гц), але також здатен вимірювати вібрації до 300 Гц [10].

Лазерний Доплерівський Віброметр (LDV) — це безконтактний оптичний прилад для вимірювання швидкості вібрацій у будь-якій точці поверхні конкретної машини [11]. Його робота базується на лазерному доплерівському ефекті, де частотно-модульований когерентний лазерний промінь відбивається від віброуючої поверхні, а зсув частоти відбитого променя порівнюється з опорним променем.

Метою експериментальних досліджень є отримання залежностей між величиною зазору в рухомих частинах механізму та показаннями вібродатчиків, встановлених на цьому механізмі. Наявність вібрацій обумовлена наявністю зазорів у парі тертя, якогось дефекту поверхні тертя або відсутності змащування. Вібрації з'являються в механізмі, при різнонаправлених навантаженнях, що виникають у досліджуваному вузлі під час його роботи.

Вібропереміщення вимірюється при низькочастотній вібрації, де верхня межа частотних складових становить 100–200 Гц. Основним параметром вібрації є віброшвидкість, яка відображає коливальну енергію. Амплітуда складових віброшвидкості залишається рівномірною в широкому діапазоні частот (10–1000 Гц), що спрощує вимірювання та підвищує його достовірність. Віброприскорення характеризує динамічний силовий вплив елементів механізму один на одного, що викликає вібрацію. Вимірювання віброприскорення є доцільним, оскільки воно достатньо точно відображає силу вібраційних коливань і не потребує додаткового перетворення в інші величини. Одиниця вимірювання – m/s^2 .

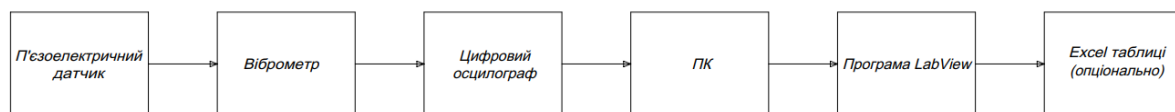


Рис. 2. Структурна схема вимірювального комплексу

Для вимірювання віброприскорення ми використали віброметр «AB-160A» (рис. 3б), в комплекті з яким використовується п'єзоелектричний акселерометр. Акселерометр має на корпусі потужний магніт для надійного закріплення на металевому корпусі досліджуваного механізму. Діапазон вимірювань віброметра наведено в таблиці 1.

У віброметра наявний аналоговий вихід, для можливості підключення до АЦП і подальшого опрацювання отриманих сигналів.

Таблиця 1

Діапазон вимірювань віброметра AB-160A

Параметр	Значення	Частота
Віброзміщення	0,001 – 4,000 мм	10 Гц – 1 кГц
Віброшвидкість	0,1 – 400,0 мм/с	10 Гц – 10 кГц
Віброприскорення	0,1 – 400,0 m/s^2	10 Гц – 1 кГц

Для перетворення отриманих сигналів (аналогового типу) в цифрові нам потрібно використати АЦП. Для цього ми використовуємо цифровий осцилограф OWON XDS2102A. Зручність використання осцилографа полягає у тому що він має вбудований цифровий фільтр для усунення шумів. Даний осцилограф має USB-порт для підключення до ПК, і можна передавати зареєстровані вібраційні сигнали у режимі реального часу. Осцилограф має два канали вимірювання і високу частоту дискретизації що збільшує точність вимірювання.

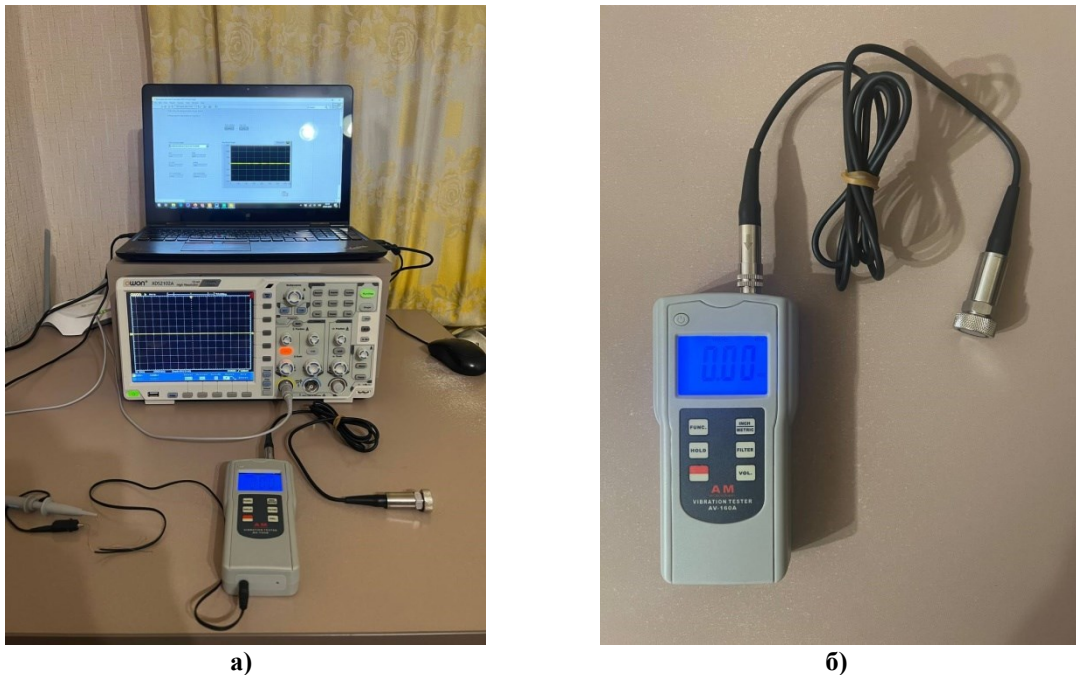


Рис. 3. Обладнання вимірювального комплексу: а) - фото вимірювального комплексу;
б) - віброметр з п'єзоелектричним акселерометром

Для опрацювання сигналів було обрано програму LabVIEW. Основними перевагами цієї програми є:

- LabVIEW застосовує цифрові фільтри для усунення шумів і покращення якості вимірюваних сигналів;
- Програма виконує Фур'є-аналіз, що дозволяє визначати основні частоти коливань і характер вібрацій;
- Вона автоматично обчислює амплітуду, швидкість і прискорення вібрацій для оцінки стану механізму;
- LabVIEW інтегрує та диференціює сигнали, що дозволяє переходити між параметрами вібрації;
- Програма зберігає отримані дані для подальшого аналізу або створення звітів.
- Вона може використовувати тригерні механізми для запуску запису сигналу при перевищенні порогових значень;
- Завдяки гнучкості LabVIEW, можна налаштовувати алгоритми аналізу відповідно до конкретних вимірювальних задач.

Програма приймає цифровий сигнал з осцилографа через інтерфейс USB і виводить його на екран у вигляді графіка. Основна функція LabVIEW у цьому вимірювальному комплексі — реєстрація, фільтрація та аналіз вібросигналу для визначення його основних характеристик, таких як амплітуда, частота, швидкість і прискорення.

На дисплеї програми видно графік (рис 3а), який відображає зміну сигналу в реальному часі, що дозволяє миттєво оцінювати поведінку системи. LabVIEW також може використовувати цифрові фільтри для усунення шумів, що покращує точність вимірювань. Крім того, програма дозволяє зберігати отримані дані у вигляді таблиць або графіків для подальшого аналізу.

Таким чином, у цьому експериментальному стенді LabVIEW відіграє роль основного інструменту для обробки та візуалізації вібраційних сигналів, що полегшує діагностику механізмів і аналіз їхньої динаміки.

Блок-діаграма (рис. 4б) в LabVIEW реалізує процес збору, обробки та збереження вібраційних сигналів, отриманих від осцилографа. Програма використовує інтерфейс VISA для зв'язку з осцилографом та отримання даних із двох каналів вимірювання. Основний сигнал передається на Waveform Graph, де візуалізується у вигляді графіка в реальному часі.

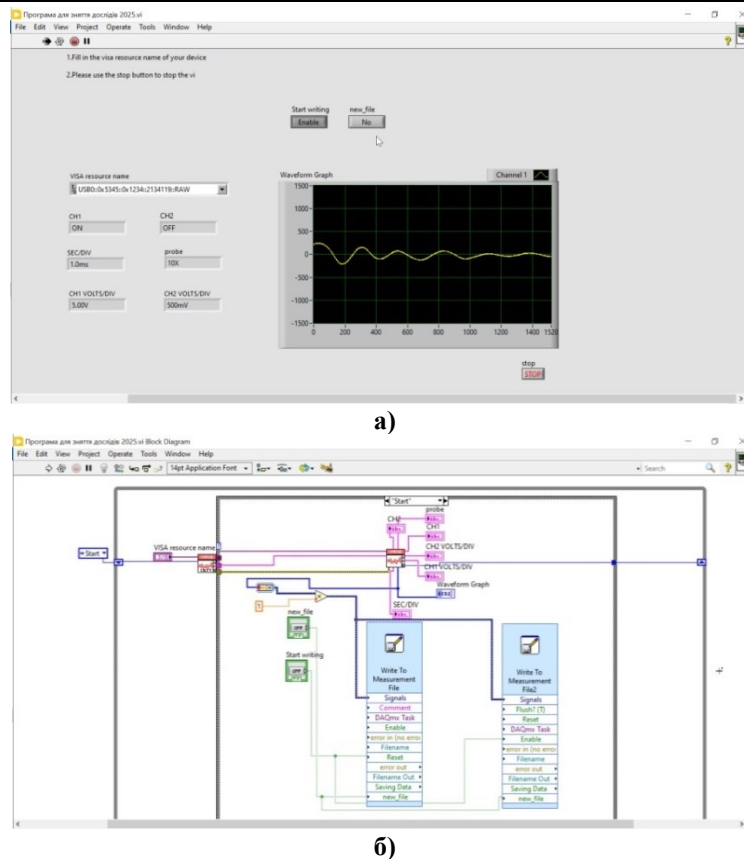


Рис. 4. Програмна частину вимірювального комплексу: а) - віртуальна панель приладів у програмі LabVIEW; б) - блок діаграма віртуальної панелі для зняття вібросигналів.

Окрім візуалізації, програма передбачає функцію запису отриманих даних у файл. Це реалізується за допомогою блоків Write To Measurement File, які відповідають за збереження сигналів у зручному для подальшого аналізу форматі. Передбачені додаткові параметри, такі як створення нового файлу та активація запису за командою користувача.

Загалом ця програма забезпечує автоматизоване вимірювання вібрацій, дозволяє контролювати параметри сигналу, здійснювати аналіз у реальному часі та зберігати дані для подальшого дослідження.

Висновки

Розроблений вібродіагностичний комплекс для дослідження трибологічних процесів забезпечує ефективну реєстрацію, аналіз і збереження вібраційних характеристик вузлів тертя машин. Використання вібраційного датчика, цифрового осцилографа та LabVIEW дозволяє виявляти зношування, недостатнє змащення та інші дефекти без демонтажу обладнання.

Підключення осцилографа до ПК через VISA-інтерфейс гарантує стабільний обмін даними, а програмне забезпечення LabVIEW виконує автоматичний аналіз сигналів у реальному часі. Запис отриманих даних у файл дозволяє детально досліджувати стан механізму.

Комплекс дозволяє оцінювати навантаження у вузлах тертя та прогнозувати їхній залишковий ресурс. Простота реалізації та можливість адаптації до різних механічних систем роблять його ефективним інструментом для наукових досліджень і промислової діагностики.

Література

1. J. J. Saucedo-Dorantes, M. Delgado-Prieto, J. A. OrtegaRedondo, R. A. Osornio-Rios, and R. D. J. Romero-Troncoso, "Multiple-fault detection methodology based on vibration and current analysis applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain," *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID 5467643, 13 pages, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/5467643>
2. K. Shahzad, P. Cheng, and B. Oelmann, "Architecture exploration for a high-performance and low-power wireless vibration analyzer," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 670–682, 2012. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6338999>
3. C. Scheffer and P. Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, Elsevier, Netherlands, Europe, 2004. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750662758/practical-machinery-vibration-analysis-and-predictive-maintenance>

4. S. A. Ansari and R. Baig, "A pc-based vibration analyzer for condition monitoring of process machinery," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 2, pp. 378–383, 1998. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/744177>
5. G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, and A. Pietrosanto, "A dspbased fft-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 6, pp. 1316–1322, 2002. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/928883>
6. B. Deb Majumder, J. K. Roy, and S. Padhee, "Recent advances in multifunctional sensing technology on a perspective of multi-sensor system: a review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 1204–1214, 2019. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8540918>
7. C. Sanders, "A guide to vibration analysis and associated techniques in condition monitoring," 2020, 20 October 2020. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/320879762/Vibration-AnalysisGuideaccessed>
8. K. W. Cheung, M. J. Starling, and P. D. McGreevy, "A comparison of uniaxial and triaxial accelerometers for the assessment of physical activity in dogs," *Journal of Veterinary Behavior*, vol. 9, no. 2, pp. 66–71, 2014. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1558787814000069>
9. D. Goyal and B. S. Pabla, "Condition based maintenance of machine tools-A review," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 10, pp. 24–35, 2015. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755581715000309>
10. M. P. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*, Elsevier, Oxford, England, 2011. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123838421/gas-turbine-engineering-handbook>
11. N. Hasheminejad, C. Vuye, W. Van den bergh, J. Dirckx, and S. Vanlanduit, "A comparative study of laser Doppler vibrometers for vibration measurements on pavement materials," *Infrastructure*, vol. 3, no. 4, p. 47, 2018. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2412-3811/3/4/47>

References

1. J. J. Saucedo-Dorantes, M. Delgado-Prieto, J. A. OrtegaRedondo, R. A. Osornio-Rios, and R. D. J. Romero-Troncoso, "Multiple-fault detection methodology based on vibration and current analysis applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain," *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID 5467643, 13 pages, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/5467643>
2. K. Shahzad, P. Cheng, and B. Oelmann, "Architecture exploration for a high-performance and low-power wireless vibration analyzer," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 670–682, 2012. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6338999>
3. C. Scheffer and P. Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, Elsevier, Netherlands, Europe, 2004. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750662758/practical-machinery-vibration-analysis-and-predictive-maintenance>
4. S. A. Ansari and R. Baig, "A pc-based vibration analyzer for condition monitoring of process machinery," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 2, pp. 378–383, 1998. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/744177>
5. G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, and A. Pietrosanto, "A dspbased fft-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 6, pp. 1316–1322, 2002. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/928883>
6. B. Deb Majumder, J. K. Roy, and S. Padhee, "Recent advances in multifunctional sensing technology on a perspective of multi-sensor system: a review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 1204–1214, 2019. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8540918>
7. C. Sanders, "A guide to vibration analysis and associated techniques in condition monitoring," 2020, 20 October 2020. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/320879762/Vibration-AnalysisGuideaccessed>
8. K. W. Cheung, M. J. Starling, and P. D. McGreevy, "A comparison of uniaxial and triaxial accelerometers for the assessment of physical activity in dogs," *Journal of Veterinary Behavior*, vol. 9, no. 2, pp. 66–71, 2014. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1558787814000069>
9. D. Goyal and B. S. Pabla, "Condition based maintenance of machine tools-A review," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 10, pp. 24–35, 2015. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755581715000309>
10. M. P. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*, Elsevier, Oxford, England, 2011. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123838421/gas-turbine-engineering-handbook>
11. N. Hasheminejad, C. Vuye, W. Van den bergh, J. Dirckx, and S. Vanlanduit, "A comparative study of laser Doppler vibrometers for vibration measurements on pavement materials," *Infrastructure*, vol. 3, no. 4, p. 47, 2018. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2412-3811/3/4/47>