

## ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРОСИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ І КОМПЛЕКСІВ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

*Вимірювання вібросигналів електромеханічних систем і комплексів в умовах виробництва відіграє надзвичайно важливу роль в забезпеченні стабільності та працездатності будь якого виробничого підприємства. Впровадження систем вібромоніторингу починається із визначення потенційних проблемних місць та вибору засобів вимірювання вібраційного сигналу в тих чи інших умовах.*

*В даній статті проведено поверхневий огляд основних засобів вимірювання вібрації відомих на сьогоднішній день.*

**Ключові слова:** вібромоніторинг, датчик вібрації, сенсор вібрації, аналізатор, вібросигнал.

### Abstract

*Measurement of vibration signals of electromechanical systems and complexes in production conditions plays an extremely important role in ensuring the stability and efficiency of any production enterprise. The implementation of vibration monitoring systems begins with the identification of potential problem areas and the selection of means of measuring the vibration signal in certain conditions.*

*In this article, a superficial review of the main means of measuring vibration known today is carried out.*

**Keywords:** vibration monitoring, vibration sensor, analyzer, vibration signal.

### Вступ

В сучасній промисловості машини є основою майже будь якого виробничого підприємства та мають першочергове значення для його функціонування. Одним із основних критеріїв діагностики електромеханічних систем і комплексів є вібрація. Завдяки вібромоніторингу можна виявити переважну більшість несправностей машини не зупиняючи її та не перериваючи технологічний процес, що дозволяє передбачити аварійні ситуації, прогнозувати планові ремонти та заощаджувати кошти підприємства.

Ключовим та фундаментальним елементом будь якої системи вібромоніторингу є засоби вимірювання вібросигналів.

Метою даної статті є огляд основних засобів вимірювання вібросигналів електромеханічних систем і комплексів в умовах виробництва.

### Основна частина

Основними інструментами вимірювання вібросигналів електромеханічних систем і комплексів в умовах виробництва є датчики та аналізатори вібрації.

Датчики вібрації можна розділити на акселерометр, індукційний сенсор, струмовихровий сенсор та лазерний доплерівський віброметр (LDV). Акселерометри можна далі розділити на п'єзоелектричні та мікроелектромеханічні системні (MEMS) акселерометри. Аналізатор вібрації в свою чергу ділиться на автономний і комп'ютерний.

Датчик або перетворювач — це пристрій, який перетворює механічні сигнали в електричні. Тип використовуваних датчиків зазвичай залежить від частотного діапазону, чутливості, дизайну та робочих обмежень [1].

Основні засоби вимірювання вібросигналів представлено на рисунку (рис.1).

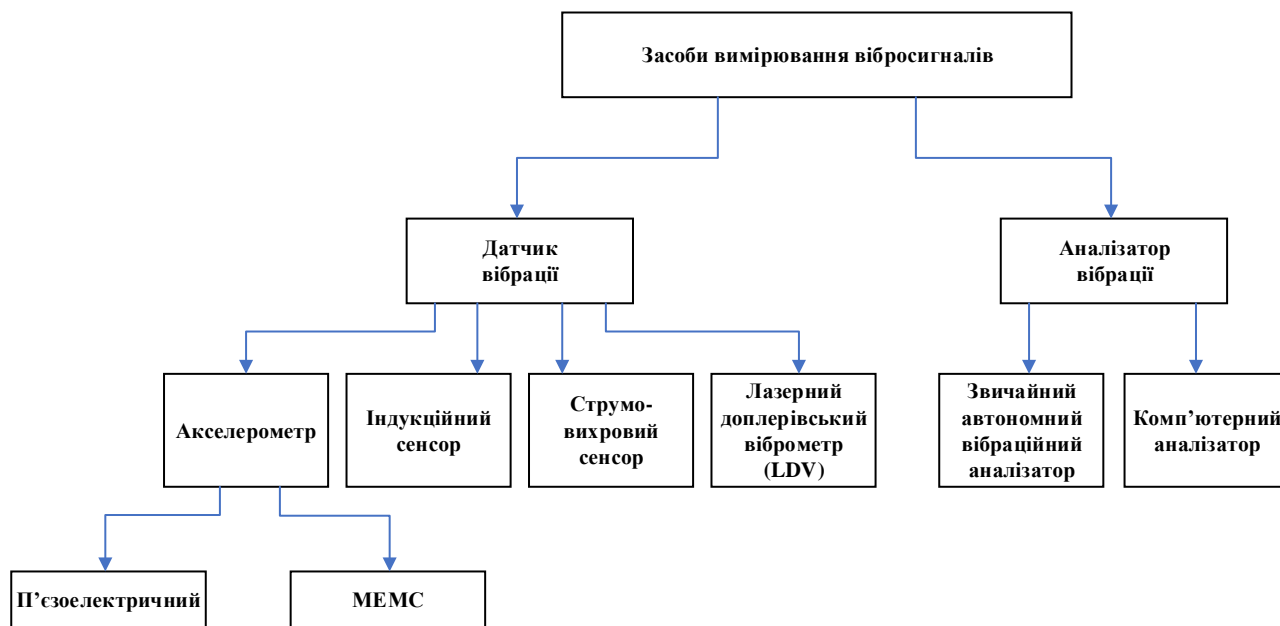


Рис. 1. Основні інструменти вимірювання вібросигналів

Акселерометр — це пристрій, який використовується для вимірювання вібрації або прискорення конструкції в одиниці СІ. Механізм роботи полягає в тому, що коли на п'єзоелектричний матеріал у акселерометрі діє сила, він створює заряд, відповідний прикладеній силі. Оскільки сила прямо пропорційна прискоренню, будь-яка зміна цього фактора призведе до зміни виробленого заряду, який потім посилюється [1].

#### П'єзоелектричні акселерометри

Використовуються для вимірювання абсолютної вібрації. Принцип дії цих сенсорів заснований на п'єзоєфекті: генерації електричного сигналу, пропорційного прискоренню при стисканні або розтягу п'єзокристалу [2].

П'єзоелектричні елементи накопичують електричні заряди у відповідь на механічний вплив, наприклад вібрацію. Кількість накопичених зарядів пропорційна рівню вібрації.

П'єзоелектричні акселерометри складаються із сейсмічної маси, прикріпленої до п'єзоматеріалу (наприклад, кераміки) (рис. 2). Коли акселерометр піддається вібрації, створюється сила, і вимірюється невелика зміна в мілівольтах. Ця напруга пропорційна прискоренню маси [3].

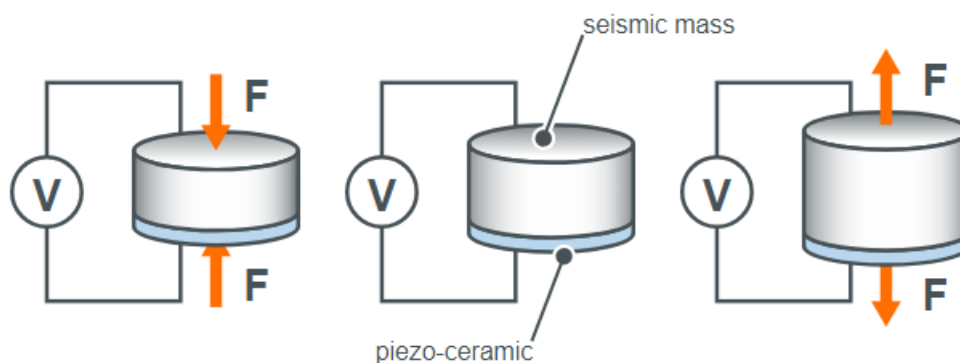


Рисунок 2 – Ілюстрація принципу роботи п'єзоелектричного акселерометра [3]

#### Переваги п'єзотехнології:

- Доступно багато варіантів і спеціальних версій;
- Широкий діапазон вимірювання (0,005...50 г);
- Висока точність у всьому діапазоні частот (Клас 1: +/- 5%);
- Широкий діапазон робочих температур (-55...125 °С);
- Низький рівень шуму незалежно від смуги пропускання.

### Недоліки п'єзотехнології

- Немає можливості самоперевірки;
- Вигини кабелю, обладнання, що швидко рухається, можуть спричинити насичення сигналу;
- Дуже чутливий до перепадів температури (до 30%) від  $-30 \dots 125$  C;
- Зазвичай використовуються спеціальні броньовані кабелі через стиснення та згинання кабелю.

### MEMS акселерометри

Технологія MEMS використовує механічні компоненти нанорозміру (10-9), які майже не мають маси чи руху. На зображенні нижче показано відносну відстань між компонентами. Оскільки ці зазори змінюються під впливом вібрації, ємність мікросхеми MEMS змінюється прямо пропорційно до вібрації (рис. 3) [3].

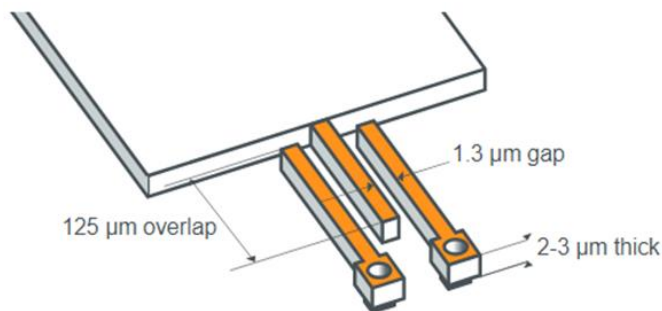


Рисунок 3 – Ілюстрація технології MEMS [3]

### Переваги технології MEMS:

- Інтегрована механічна система та вимірювальна електроніка для міцної та надійної роботи;
- Активна самоперевірка;
- Плоский температурний відгук ( $< 2\%$ ) між  $-30 \dots 125$  °C;
- Відсутність старіння, тому періодична перевірка калібрування не потрібна;
- Відсутність насичення сигналу внаслідок удару, згинання або стиснення кабелю;
- Підключення за допомогою стандартних екранованих кабелів M12.

### Недоліки технології MEMS

- Менше варіантів;
- Підвищений рівень шуму;
- Шум залежить від смуги пропускання.

### Індукційні сенсори

Індукційні сенсори, або як їх ще називають датчики швидкості, використовуються для вимірювання абсолютної вібрації.

Датчик швидкості вимірює напругу, створювану відносним рухом об'єкта, зазвичай у м/с або см/с. Він працює на основі концепції електромагнітної індукції і може працювати без будь-якого зовнішнього пристрою. Коли поверхня, на якій встановлено датчик, вібує, рух магніту в котушці вироблятиме напругу, пропорційну швидкості вібрації. Цей сигнал напруги відображає вироблену вібрацію, а потім подається на вимірювальний прилад або аналізатор [1].

До основних компонентів індукційного сенсора можна віднести: роз'єм, пружина, котушка, магніт, демпферна рідина. Внутрішня будова показана на рисунку (4) [4].

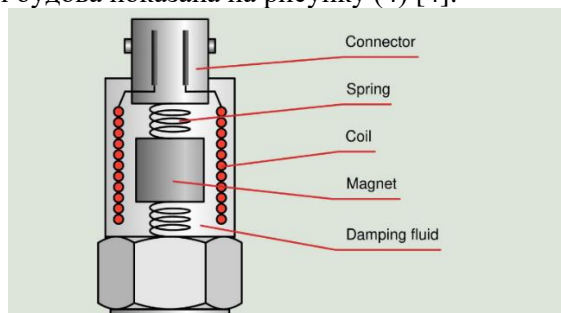


Рисунок 4 – Внутрішня будова індукційного сенсора [4]

#### Переваги:

- Високий рівень вихідного сигналу, що дозволяє не застосовувати підсилювач;
- Велике відношення сигнал/шум.

#### Недоліки:

- Великі розміри, у порівнянні з п'єзосенсорами, розміри і вага;
- Обмежений частотний діапазон вимірювань і діапазон робочих температур;
- Висока вартість;
- Не рекомендуються при діагностиці високошвидкісних механізмів, оскільки діапазон робочих частот обмежений від 10 Гц до 2 кГц.

#### Струмовихрові сенсори

Використовуються для вимірювання відносної вібрації. Струмовихровий сенсор вимірювання вібрації ще називають датчиком переміщення або датчиком наближення, вимірює як відносну вібрацію, так і положення валу. Одиницею об'єму може бути м, см або мм. Зазвичай він використовується для вимірювання низькочастотної вібрації менше 10 Гц, але він також може вимірювати вібрацію до 300 Гц. Однак вони не є найкращими у вимірюванні вигину вала від місця розташування зонда. Проблеми з дисбалансом і зміщенням – це типи проблем, які можна виявити датчиком переміщення. Для вимірюваних частот вібрації вище 1 кГц амплітуда зазвичай втрачається на рівні шуму [1].

Датчик переміщення, також відомий як зонд «вихрових струмів», зазвичай використовується для низькочастотних вимірювань (нижче 1000 Гц) у підшипниках ковзання турбомашин. Проксиметри використовуються для вимірювання радіального або осевого зміщення валу [5].

Внутрішня будова струмовихрового сенсора показана на рисунку (рис. 5).

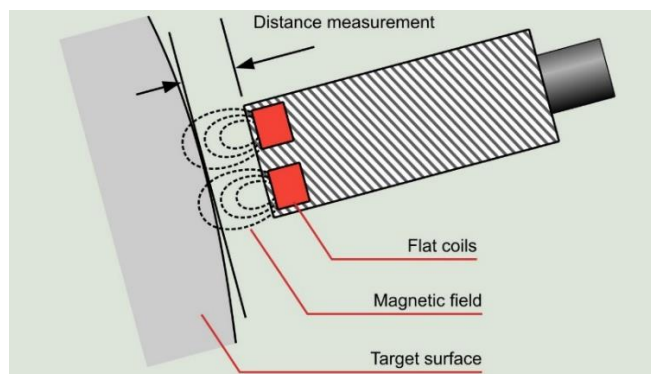


Рисунок 5 – Внутрішня будова струмовихрового сенсора [5]

#### Переваги:

- Можливість безпосереднього вимірювання коливань і положення ротора щодо підшипників;
- Низький поріг чутливості: можливість вимірювати малі рівні коливань вала;
- Проста схема постобробки з незначним обслуговуванням.

#### Недоліки:

- Складність установки;
- Складність настроювання.

#### Лазерний доплерівський віброметр

Лазерний доплерівський віброметр (LDV) є безконтактним оптичним вимірювальним приладом, який можна застосовувати для визначення вібраційних швидкостей будь-яких точок на поверхні конкретної машини. Механізм роботи LDV заснований на концепції лазерного Доплера, коли частотно-модульований когерентний лазерний промінь відбивається від віброуючої поверхні, а доплерівський зсув відбитого променя порівнюється з еталонним променем. Наразі інфрачервоний (невидимий) волоконний лазер більшої потужності є більш популярним у LDV порівняно з He-Ne лазером. Лазерний промінь безперервно виконує сканування вздовж визначеної траєкторії через структуру відповідно до бажаних частот сканування [1]. Основні вузли лазерного доплерівського віброметра показано на рисунку (рис. 6).

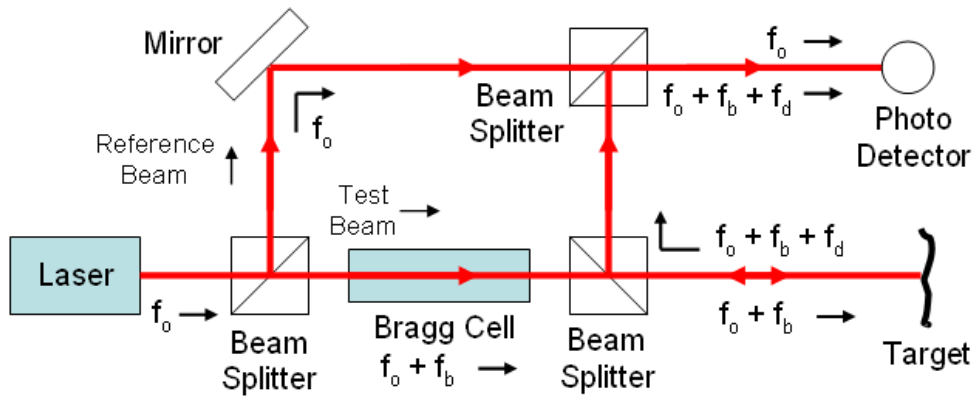


Рисунок 6 – Основні вузли лазерного доплерівського вібрметра [6]

Переваги:

- Легкість зміни точки вимірювання, що можна зробити, просто відхиливши лазерний промінь.

Недоліки:

- Висока вартість;
- Низька портативність.

Аналізатор вібрації

Аналізатор — це прилад, який використовується для аналізу даних про вібрацію, створювану машиною. Він складається з датчика (який представлений у наступному розділі цієї статті), підсилювача, фільтра та аналого-цифрового перетворювача. Сигнал від датчика вібрації проходить через підсилювач для збільшення роздільної здатності та співвідношення сигнал/шум. Посилений сигнал потім проходить через фільтр, щоб на етапі оцифрування не виникало накладання спектрів. Сигнал оцифровується в аналого-цифровому перетворювачі, а потім проходить через блок обробки, де його можна відобразити як форму хвилі в часі або можна додатково обробити для отримання частотного спектру. Вібраційний аналізатор можна розділити на звичайний і комп'ютерний вібраційний аналізатор (рис. 7) [1].



Рисунок 7 – Звичайний вібраційний аналізатор (зліва) [7] та комп'ютерний аналізатор (справа) [8]

Звичайний вібраційний аналізатор — це окремий прилад, створений спеціально для вібрації. Це складний і дорогий інструмент, який зазвичай використовують експерти з вібрації. Цей інструмент може допомогти користувачеві визначити наявність проблеми, а також її першопричину та час відмови машини [1].

Комп'ютерний вібраційний аналізатор – це новий інструмент, за допомогою якого дані про вібрацію можна обробляти віртуально за допомогою спеціального програмного забезпечення та персонального комп'ютера. Цей метод набув популярності, оскільки він простий, недорогий і легкий у ремонті, і може виконувати більшість функцій, доступних у звичайному вібраційному аналізаторі, такому як осцилограф, мультиметр і генератор сигналу [1].

## Висновки

Проведено огляд засобів вимірювання вібросигналів електромеханічних систем і комплексів в умовах виробництва. Можна зробити висновок, що кожен із перелічених засобів має свої певні переваги та недоліки в тих чи інших умовах експлуатації. В стаціонарних польових умовах майбутні засоби вимірювання сигналів вібрації за безконтактними датчиками. А завдяки розвитку новітніх технологій аналіз вібросигналів поступово ставатиме більш дешевшим та доступнішим. В зв'язку з інтенсивним розвитком потужного програмного забезпечення та інтернету, в найближчому майбутньому комп'ютерний аналізатор стане кращим рішенням для аналізу вібрації, адже стане дешевшим та продуктивнішим.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. M. H. M. Ghazali and W. Rahiman, «Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review», Hindawi, Shock and Vibration, Volume 2021, Article ID 9469318, 25 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
2. Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія. / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. В. Усов та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 169 с.
3. <https://www.ifm.com/us/en/us/real-time-maintenance/vibration/technology/accelerometers>.
4. <https://power-mi.com/content/seismic-velocity-transducers>
5. <https://power-mi.com/content/displacement-sensors>
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_Doppler\\_vibrometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Doppler_vibrometer)
7. <https://ukrintech.com.ua/analizator-vibratsii-z-funktsiieiu-lazernoho-tsentruvannia-ms54pro>
8. <https://uptimeworks.com/vibration-analysis-software/>

**Осельський Олександр В'ячеславович** – аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; провідний інженер з автоматизованих систем керування виробництвом, ТОВ «КСК-Автоматизація» Вінницька філія, м. Вінниця, e-mail: [oselskyi.ov@gmail.com](mailto:oselskyi.ov@gmail.com)

**Василь Васильович Кухарчук** - професор, д.т.н., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Науковий керівник: **Василь Васильович Кухарчук** - професор, д.т.н., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Oselskyi Oleksandr V** – postgraduate Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia; leading engineer for automated production control systems, «CSC-Automation» Ltd Vinnytsia branch, Vinnytsya, e-mail: [oselskyi.ov@gmail.com](mailto:oselskyi.ov@gmail.com)

**Vasyl V Kukharchuk** - Professor, Dr Sc. (Eng.), Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Vasyl V Kukharchuk** - Professor, Dr Sc. (Eng.), Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.