

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ  
МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ГІДРОАГРЕГАТІВ**

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2019

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/516>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 681.518.3  
О-75

Автори:

**В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк, С. Ш. Кацев, В. Г. Мадьяров**

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 4 жовтня 2018 року)

Рецензенти:

**Кулик А. Я.**, доктор технічних наук, професор

**Васілевський О. М.**, доктор технічних наук, професор

**Особливості** побудови системи моніторингу  
О-75 технічного стану та діагностування гідроагрегатів :  
монографія / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк, С. Ш. Кацев,  
В. Г. Мадьяров. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 91 с.

ISBN 978-966-641-754-4

Монографія містить елементи теорії вимірювання та контролю вібраційних параметрів та діагностування технічного стану гідроагрегатів. Пропонуються уточнені математичні моделі вимірювальних перетворювачів, методи підвищення точності вимірювання, методи та засоби контролю і діагностування технічного стану гідроагрегатів. Монографія розрахована на інженерів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів, що спеціалізуються в галузі експериментальної інформатики та електротехніки.

УДК 681.518.3

ISBN 978-966-641-754-4

© В. Кухарчук, В. Граняк, С. Кацев, В. Мадьяров, 2019

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	5
ВСТУП.....	6
1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ САДП-РДГ ТА ЇЇ СТРУКТУРА .....	7
2 ПІДСИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ .....	14
2.1 Математичні моделі та принцип дії ємнісного акселерометра.....	15
2.1.1 Математичні та електричні моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра.....	17
2.1.1.1 Уточнені математична та електрична моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра.....	19
2.1.1.2 Спрощені математична та електрична моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра.....	23
2.2 Засоби вимірювання вібрації.....	25
2.2.1 Метод вилучення гравітаційної похибки засобу вимірювання віброприскорення на основі автоматичного самокалібрування засобу вимірювання .....	26
2.2.2 Засіб, що реалізує метод вилучення гравітаційної похибки.....	27
3 ПІДСИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ІСНУЮЧИХ ДЕФЕКТІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ.....	31
3.1 Структура та принципи побудови підсистеми діагностування .....	31
3.2 Штучна нейроподібна мережа для діагностування існуючих дефектів гідроагрегатів .....	32
3.3 Математичні моделі та алгоритми експериментального визначення фонових, електродинамічних та гідродинамічних складових АЧЧС вібросигналу і вагових коефіцієнтів.....	46

3.4 Попередні діагностичні висновки щодо існуючих дефектів гідроагрегатів Нижньодністровської ГЕС.....	57
4 ПІДСИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ.....	65
4.1 Структура та принципи побудови підсистеми прогнозування розвитку дефектів.....	65
4.2 Штучна нейрподібна мережа для прогнозування розвитку дефектів.....	65
4.3 Попередні прогностичні висновки щодо розвитку дефектів гідроагрегатів Нижньодністровської ГЕС.....	70
ВИСНОВКИ .....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	77
ДОДАТОК А .....	83
ДОДАТОК Б.....	84
ДОДАТОК В.....	88

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧЧС	– амплітудно-частотно-часовий спектр
ВВП	– вихрострумний вимірювальний перетворювач
ВКФ	– перетворення Фур'є
ВП	– вимірювальний перетворювач
ДВП	– дискретне вейвлет перетворення
ЕРС	– електрорушійна сила
ЗВ	– засіб вимірювання
ЗК	– засіб контролю
МХ	– метрологічні характеристики
САПР-РДП	– система автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів
СКВ	– середньоквадратичне відхилення
ШНМ	– штучна нейроподібна мережа

## ВСТУП

Швидкий розвиток систем контролю та діагностики силових електричних машин (в тому числі і турбо- та гідрогенераторів) спричинений зростанням одиничної потужності останніх та обсягом встановленого устаткування, а також більш широких можливостей контролю з використанням новітніх засобів вимірювання та обчислювальної техніки. Потреба у вдосконаленні методів і засобів контролю швидко зростає і завдяки тому, що збільшується кількість обладнання, номінальний термін експлуатації якого закінчився, про те їх експлуатація продовжується. Зокрема, в більшості промислово розвинених країн частка такого обладнання серед потужних турбо- та гідрогенераторів на початок 21-го століття перевищила 50 % [1].

Використання систем контролю та діагностування є ефективним напрямком підвищення ефективності та безпеки експлуатації силового електричного обладнання. Головною задачею, що стоїть перед системою контролю та діагностування, є оцінка поточного (безремонтного) ресурсу обладнання та захист останнього від виникнення аварійних ситуацій, що можуть супроводжуватися як масштабними економічними втратами, так і нести серйозну загрозу для життя та здоров'я персоналу. А оскільки класичні підходи до побудови систем моніторингу та захисту гідроагрегатів, що базувалися переважно на аналізі електричних параметрів, довели свою недостатню ефективність, то стійкою тенденцією у розвитку таких систем є використання опосередкованих методів контролю, що базуються на використанні проміжних неелектричних параметрів.

Проте, на сьогоднішній день, використання таких підходів є все ще обмеженим через відсутність не лише чітких математичних моделей, а й високоінформативних ознак, аналіз яких давав би змогу виявляти та локалізувати причину зміни основних технічних параметрів силових обертових машин.

Виходячи зі сказаного, розробка сучасних методів вимірювання та інтерпретації вібросигналів, а також побудова на їх основі сучасних систем моніторингу та діагностування, є актуальною науково-прикладною задачею, що потребує проведення глибоких науково-практичних досліджень.

Метою роботи є розробка високоінформативної системи моніторингу технічного стану та діагностування гідроагрегатів. Досягнення поставленої мети передбачає не лише розробку високоточних методів та засобів, що дозволили б забезпечити підвищення вірогідності контролю технічних параметрів та ефективності підсистем діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів, а й узагальненої структури та принципів побудови системи в цілому.

Монографія складається зі вступу і чотирьох розділів та містить бібліографічний список із 61 найменування.

# 1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ САДП-РДГ ТА ЇЇ СТРУКТУРА

САДП-РДГ базується на модифікованій частотній технології вібродіагностування.

В основу алгоритмів САДП-РДГ покладені такі принципові підходи:

1. Застосування математичного апарату вейвлет-перетворень для спектрального аналізу вібросигналів.

Найбільш поширена частотна технологія вібродіагностування, зазвичай, базується на аналізі спектрів вібросигналів, які отримуються за допомогою звичайного перетворення Фур'є, що дає адекватний результат лише для стаціонарних сигналів [2, 3].

Разом з тим, вібросигнал гідроагрегату є суттєво нестационарним, тобто його спектр змінюється в часі. В цьому випадку звичайне перетворення Фур'є є неадекватним і доводиться використовувати так звані частотно-часові перетворення.

Результатом частотно-часового перетворення сигналу є комплексна функція двох змінних, яка залежить від частоти і часу.

Частотно-часові перетворення суттєво відрізняються від частотних тим, що для них діє відомий з фізики принцип невизначеності Гейзенберга, який для цього виду перетворень можна сформулювати так: ні для якого фіксованого моменту часу неможливо визначити, які спектральні компоненти містяться в сигналі [4].

Виходячи з цього принципу, ми можемо визначати лише часові інтервали, протягом яких сигнал містить смуги частот.

Звідси, в свою чергу, випливає, що, якщо розмір вікна (тобто часовий інтервал) буде малим, що означає високу часову локалізацію спектра, то смуга частот буде дуже розмитою і навпаки, більш точне визначення спектральних компонентів потребує великого вікна.

Одним з таких перетворень є так зване віконне перетворення Фур'є (ВПФ). Найбільш суттєвим недоліком ВПФ є фіксована ширина вікна (тобто часового інтервалу). Це приводить до того, що у випадку малого розміру вікна ВПФ будуть добре визначені високі частоти і погано низькі, а якщо вибрати велике вікно, то навпаки. Інакше кажучи, ВПФ на широкому діапазоні частот має недостатню роздільну здатність [3, 5, 6].

Таким чином, для аналізу сигналів на широкому діапазоні частот слід використовувати частотно-часове перетворення із змінною шириною вікна (таке вікно іноді називають вікном Гейзенберга). Таке перетворення отримало назву вейвлет-перетворення.

Авторами було запропоновано здійснювати спектральний аналіз вібросигналів за допомогою дискретного вейвлет-перетворення (ДВП), яке має змінну ширину вікна. Це дало можливість отримати тривимірний амплітудно-частотно-часовий спектр (АЧЧС) вібросигналу зі змінною шириною вікна і забезпечити оптимальну роздільну здатність спектральних характеристик.

2. Застосування нейромережевої технології отримання діагностичних та прогнозних висновків стосовно наявності та розвитку конструктивних дефектів об'єкта.

Основною причиною необхідності застосування нейромережевої технології для діагностування дефектів гідроагрегату є його виключна складність як динамічної гідроелектромеханічної системи і практичної неможливості математичного опису залежності віброакустичного сигналу від усіх чинників, які викликають вібрацію.

Тому доцільно розглядати гідроагрегат як «чорний ящик», тобто моделювати не його структуру, а зовнішнє функціонування. Тому для діагностування дефектів гідроагрегату в САДП-РДГ передбачено побудову штучної нейроподібної мережі (ШНМ).

ШНМ призначається для отримання діагностичних та прогнозних висновків стосовно наявності та розвитку конструктивних дефектів об'єкта, які є причинами виникнення вібрацій. Розглянемо це питання детальніше.

Нижче перераховані причини виникнення небезпечної вібрації гідроагрегату.

### **Неврівноваженість ротора**

Неврівноваженістю ротора називають такий стан ротора, при якому під час обертання виникають відцентрові сили і моменти, що викликають змінні навантаження на опори ротора і його вигин. Неврівноваженість ротора можуть викликати джерела механічного походження, гідродинамічного тощо. При неуврівноваженості ротора та відсутності інших розвинутих дефектів агрегату в багатьох випадках вібросигнал є періодичним або майже періодичним, із періодом коливань, що відповідає частоті обертання ротора  $f_r$  [7, 8].



## Порушення жорсткості опорної системи

В цей клас дефектів прийнято об'єднувати ті, що спричиняють нерозраховану зміну жорсткості опорної системи і підвищення вібрації устаткування. З появою дефектів цієї групи вібрація іноді може багаторазово перевищувати припустимі значення.

Вплив жорсткості опорної системи на вібрацію очевидний. Амплітуда вібрації обернено пропорційна динамічній жорсткості  $A = P_0 C_d^{-1}$ , де  $A$  – амплітуда вібрації;  $C_d$  – динамічна жорсткість,  $P_0$  – амплітуда сили.

Істотно знижується динамічна жорсткість в області резонансу. При резонансі навіть невеличкі сили спричиняють надмірну вібрацію опор. Для усунення цієї проблеми необхідне налагодження опорної системи від резонансу зміною її жорсткості, звичайно вбік збільшення, або маси.

Нелінійна жорсткість опор характеризується порушенням пропорційності між силою і деформаціями. Внаслідок нелінійності навіть при впливі гармонічної сили порушення і гармонічних переміщення вала опорна реакція може мати складний спектр, що містить різні гармоніки оборотної частоти ( $f_r$ ).

Окрім звичайних гармонік, в спектрі вібросигналу при порушенні жорсткості можуть спостерігатися і так звані *субгармонічні* коливання. Субгармонічні коливання мають частоту, у ціле число разів меншу частоти обертання, при цьому переважають коливання з половинною частотою  $\frac{f_r}{2}$  [7, 8].

## Дефекти турбінного підшипника

Турбінний підшипник є підшипником ковзання і причини його виходу з ладу можна умовно розділити на дві групи:

- низькочастотна вібрація підшипників, що виникає внаслідок втрати динамічної усталеності обертання ротора і порушення умов мастила;
- вібрація, пов'язана з дефектами виготовлення, складання й експлуатації підшипників ковзання, що включають різноманітні дефекти складання і підгонки підшипників і відхилення їхніх геометричних розмірів від номінальних, експлуатаційна зношеність підшипників тощо.

Характерні риси вібрації при зародженні і розвитку дефектів підшипників ковзання можуть бути дуже різними і залежать від багатьох чинників. Основні з них: розмір і місце прикладення сил, перерозподіл реакцій, навантаженість опор, якість та умови роботи мастильного прошарку в підшипниках, частота обертання ротора, ступінь розвитку дефектів підшипників тощо. У вібраційному сигналі можуть бути присутні коливання з частотою обертання ротора, можливо її гармоніками, субгармоніками і дрібними гармоніками, некрatними частоті обертання ротора тощо [7, 9].

Таким чином ці дефекти проявляються в смугах частот низькочастотного і середньочастотного діапазонів.

#### **Дефекти опорно-упорного підшипника**

Цей підшипник теж є підшипником ковзання і його дефекти теж впливають на смуги частот низькочастотного і середньочастотного діапазонів.

#### **Порушення гідродинаміки потоку**

Джерелами вібрації в цих випадках є: турбулентність потоку, яка створює випадкові пульсації тиску; вихроутворення, що виникають навколо лопатей гідротурбіни; гідродинамічна нерівноваженість робочого колеса; кавітації в потоку рідини тощо.

Досить часто на крайках лопатей у потоці виникають вихори, які спричиняють випадкові пульсації тиску, що викликає коливання корпусів і робочих лопатей. Пульсації тиску, що викликаються вихроутворенням потоку в області робочого колеса, які виникають внаслідок порушення форми лопатей робочого колеса, спричиняють небезпечні резонансні низькочастотні коливання опорної частини цього агрегату.

Неоднорідність потоку в проточній частині – одне із найбільш характерних і інтенсивних джерел гідродинамічних коливань. Причина цих коливань – нерівномірність поля швидкостей і тисків по кроку між лопатями колеса. За частотним складом пульсації цих сил є складними коливаннями, що містять компоненти на частоті обертання ротора, лопатевій частоті і їхніх гармоніках, а також бічні частоти навколо лопатевих частот. Ці імпульси тиску носять гармонічний характер. Частота проходження лопатевих імпульсів залежить від частоти обертання ротора та числа лопатей робочого колеса. У найпростішому випадку вона визначається за формулою

$f_n = z_n f_r$ , де  $z_n$  – кількість робочих лопатей колеса;  $f_n$  – лопаткова частота;  $f_r$  – частота обертання ротора.

Специфічним джерелом коливань агрегату є кавітація, що виникає при місцевому зниженні тиску в тих областях потоку, де швидкість її сягає максимального значення, тобто при обтіканні тіл або в районі ядер вихорів. Вібрація при кавітації носить випадковий характер, коливання лежать в області середніх і високих частот і можуть бути великі за значенням. У випадку збігу власних частот коливань робочих лопатей або деталей насоса з частотами коливань, що виникають при кавітації, особливо при малих подачах, можлива поява інтенсивних автоколивань лопатей і навіть ротора, що надзвичайно небезпечно і може призвести до швидкої руйнації агрегату.

Характерною особливістю вібраційного процесу в гідроагрегаті є суттєва залежність від рівня води у водосховищі.

Якщо рівень води дуже низький, значно зменшується ламінарність потоку води і поряд із вібраціями на лопатевій частоті, сильно зростає низькочастотна вібрація, що вкрай небезпечно. Інфразвукові коливання часто викликають резонанси значних частин і деталей агрегату, що швидко руйнують агрегат у цілому [7, 9].

#### **Вібрації електромагнітного походження**

У електричних машинах присутні два основних види сил порушення вібрацій електромагнітного походження:

- радіальні сили, що виникають при тимчасових і просторових змінах магнітного поля в повітряному зазорі між ротором і статором;
- тангенціальні сили, що виникають при взаємодії магнітного поля з лінійним струмовим навантаженням машини.

Характер цих сил визначається зміною МДС обмоток і магнітної провідності повітряного зазору машин, тобто індукцією магнітного поля і лінійним струмовим навантаженням в обмотках машини. При цьому електромагнітні сили можуть викликати значні деформації магнітного осердя, збуджуючи просторові коливання статора і вигин ротора. Джерела електромагнітних сил розподілені в просторі і не мають конкретної точки прикладання.

Вібрація електромагнітного походження має загальну властивість: її рівень стрибкоподібно падає при відключенні машини від мережі в момент початку зупинки. Розмір стрибка вібрації відносно її вихідного розміру говорить про «внесок» механічних і електромагнітних дефектів у загальний розмір вібрації.

При виникненні дефектів електромагнітного походження, у відсутності інших дефектів машини, рівень випадкової вібрації (шумовий компоненти) практично не змінюється, а високочастотні гармонічні складові, як правило, мають порівняно невеликі значення [7].

Узагальнену структурну схему САДП-РДГ зображено на рис. 1.1.

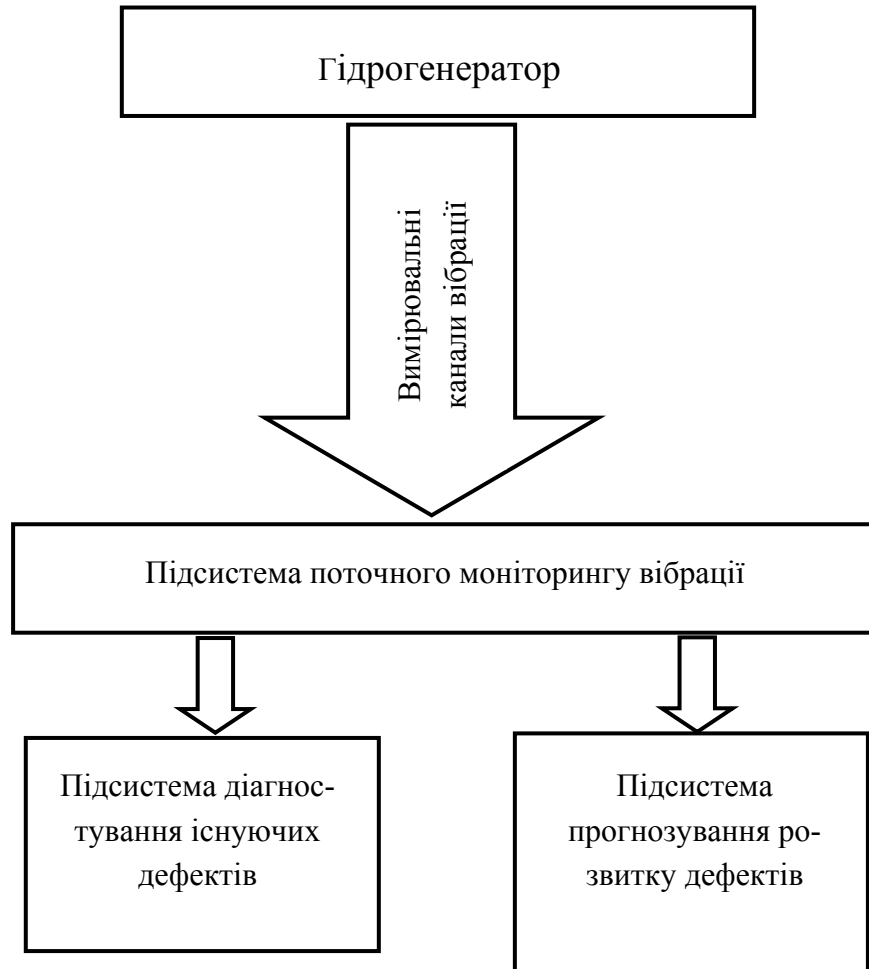


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема САДП-РДГ

САДП-РДГ є апаратно-програмним комплексом, який містить:

- вимірювальні канали вібрації;
- підсистему поточного моніторингу вібрації;
- підсистему діагностування існуючих дефектів;
- підсистему прогнозування розвитку дефектів.

### **Вимірювальні канали вібрації**

Вібросенсори кожного вимірювального каналу за допомогою своїх первинних вимірювальних перетворювачів перетворюють механічні коливання, що викликані обертанням ротора гідроагрегату, в функціонально з ними пов'язані електричні сигнали, значення яких прямо

пропорційне рівню вібрації в двох ортогональних напрямках. Крім вібросенсорів до складу вимірювального каналу входить агрегатний мікроконтролер, в якому здійснюється фільтрація, підсилення і аналого-цифрове перетворення отриманих з виходу сенсорів аналогових електричних сигналів. Для виділення сигналів, що надходять від вібросенсорів, які встановлено на гідроагрегаті, використовуються фільтри нижніх частот.

#### **Підсистема поточного моніторингу вібрації**

Підсистема моніторингу отримує інформацію від вимірювальних каналів вібрації, виконує первинну обробку віброакустичних сигналів, їх архівацію та передає ці сигнали в підсистеми діагностування та прогнозування. В оперативному режимі підсистема може виявляти також небажані тенденції в зміні параметрів, а саме: контроль значення скачка параметра; контроль тренда; контроль низькочастотних і високочастотних складових вібрації опор підшипників; контроль частоти обертання вала ротора тощо.

Підсистема також веде архів контрольованих параметрів і подій, надає можливість перегляду архівів та видачі загальної інформації про стан об'єкта моніторингу у вигляді звітів.

#### **Підсистема діагностування існуючих дефектів**

Ця підсистема призначена для отримання діагностичних висновків щодо існуючих дефектів гідроагрегату для кожного моменту часу з надмірним віброзміщенням.

На початку роботи підсистеми в ній формується ШНМ, яка протягом періоду дослідної експлуатації постійно настроюється.

Вхідними даними підсистеми діагностування є масив, який надходить від підсистеми моніторингу. Він містить в собі стеки значень вібросигналів, які підсистема моніторингу одержує від вібросенсорів.

Крім того, підсистема отримує дані про поточні значення навантаження гідрогенератора і значення рівня води у водосховищі.

#### **Підсистема прогнозування розвитку дефектів**

Ця підсистема призначена для отримання прогнозних висновків щодо розвитку дефектів гідроагрегату протягом його експлуатації.

На початку роботи підсистеми в ній також формується ШНМ, яка протягом періоду дослідної експлуатації постійно настроюється.

Вхідні дані підсистеми прогнозування такі ж самі, як і в підсистемі діагностування.

В наступних розділах розглянемо складові системи детальніше.

## 2 ПІДСИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ

Ключовою ланкою системи моніторингу вібрації є первинний вимірювальний перетворювач (сенсор). Найбільше поширення на сьогодні одержали три типи сенсорів: п'єзосенсори (п'єзоелектричні акселерометри), ємнісні сенсори, індукційні сенсори і струмовихрові сенсори [7].

**П'єзосенсори** використовуються для вимірювання абсолютної вібрації. Принцип їх дії заснований на п'єзоефекті: генерації електричного сигналу, пропорційного прискоренню при стисканні або розтягу п'єзокристалу.

Перевагами цих сенсорів є:

- широкий діапазон частот роботи;
- тривкість конструкції;
- компактність.

Недоліки: можливе перевантаження підсилювача.

**Індукційні сенсори** використовуються для вимірювання абсолютної вібрації. Принцип дії індукційних сенсорів заснований на ефекті електричної індукції, тобто генерації електричного сигналу пропорційного швидкості у котушці, яка рухається відносно постійного магніту.

Перевагами цих сенсорів є:

• високий рівень вихідного сигналу, що дозволяє не застосовувати підсилювач;

- велике відношення сигнал/шум.

Недоліки:

• великі, у порівнянні з п'єзосенсорами, розміри і вага;

• обмежений частотний діапазон вимірювань і діапазон робочих температур;

- висока вартість.

Ємнісні сенсори використовуються для вимірювання абсолютної вібрації. В основу їх принципу дії покладено ефект зміни ємності конденсатора при зміні його геометрії.

Перевагами цих сенсорів є:

- висока чутливість;

- висока стійкість до перевантажень;
- простота та компактність конструкції;
- можливість роботи на низьких частотах;
- простота монтажу та налаштування.

Недоліки:

- вплив проекції гравітаційної складової на вихідний сигнал.

**Струмовихрові сенсори** використовуються для вимірювання відносної вібрації.

Перевагами цих сенсорів є:

- можливість безпосереднього вимірювання коливань і положення ротора щодо підшипників;
- низький поріг чутливості: можливість вимірювати малі рівні коливань вала.

Недоліки:

- складність установки;
- складність налаштування.

Враховуючи переваги та недоліки наведених типів первинних вимірювальних перетворювачів вібрації, а також те, що переважна більшість гідроагрегатів відноситься до тихохідних електричних машин з частотою обертання меншою 3 Гц [10], найбільш перспективним типом первинних вимірювальних перетворювачів для вимірювання параметрів вібрації гідроагрегатів є ємнісні сенсори. Про те їхнє широке застосування значною мірою ускладнюється відсутністю високоточних математичних моделей останніх, що могли б бути використані для отримання рівняння перетворення при побудові засобів вимірювання вібрації.

## 2.1 Математичні моделі та принцип дії ємнісного акселерометра

Для вимірювання вібрацій в теперішній час застосовують акселерометри, що являють собою сенсори лінійних прискорень. Структурну схему одного з таких сенсорів наведено на рис. 2.1. Він являє собою диференціальну конденсаторну структуру з повітряним діелектриком. Електроди конденсатора вирізані з плоского куска полікремнієвої плівки товщиною 2 мкм. Нерухомими електродами цього конденсатора є прості консольні стержні, що розташовані на висоті

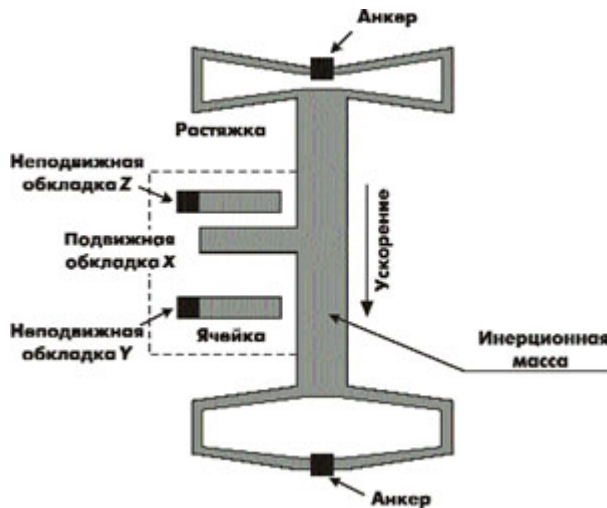


Рисунок 2.1 – Структурна схема емнісного акселерометра

1 мкм від поверхні кристала в повітрі на полікремнієвих стовпчиках-анкерах, що приварені до кристала на молекулярному рівні.

Тут показано тільки основний конструктивний блок сенсора. Фактично сенсор має 54 таких елементарних комірки. Інерційна маса сенсора прискорення під час вимірювання швидкості переміщення зміщується відносно іншої ча-

стини кристала. Її пальцеподібні виступи утворюють рухомий електрод конденсатора. Обидві сторони цієї структури опираються на стовпчики-анкери. Розтяжки, що утримують інерційну масу, виконують роль механічної пружини постійної пружності, що обмежує переміщення маси і її повернення у вихідне положення. Під дією прискорення сила інерції

$$F = ma \quad (2.1)$$

врівноважується силою пружини

$$F = kx, \quad (2.2)$$

де  $m$  – маса,  $a$  – прискорення;  $x$  – зміщення маси відносно вихідного положення.

Прирівнявши силу інерції і силу протидії, отримаємо

$$a = \frac{k}{m}x = S_a \cdot x. \quad (2.3)$$

Причому  $S_a = \frac{k}{m} = \text{const}$  – чутливість, значення якої залежить від конструктивних параметрів ( $k$  і  $m$ ) сенсора.

Оскільки переміщення інерційної маси відбувається в площині полікремнієвої плівки, то вісь чутливості сенсора знаходиться в цій же площині і, відповідно вона паралельна площині друкованої плати до якої закріплюють сенсор.



В стані спокою (рух з постійною швидкістю) всі «пальці» рухомого електрода, завдяки дії розтяжки, знаходяться на однаковій відстані від пари «пальців» нерухомого електрода. При будь-якому прискоренні рухомі електроди наближаються до одного з наборів нерухомих електродів і віддаляються від другого набору. В результаті цього відносне переміщення стає не однаковим, і ємність між рухомих електродом і кожним із нерухомих електродів змінюється пропорційно віброприскоренню.

Завершуючи знайомство з акселерометрами ємнісного типу, наведемо декілька цифр, що характеризують конструкцію і рівень технології виготовлення цих сенсорів (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри акселерометрів ємнісного типу

Найменування параметра		Числове значення
1	Інерційна маса	0,1 мкг
2	Ємність кожної частини диференціального конденсатора	0,1 пФ
3	Мінімальне розрізнення відхилення ємності	20 аФ ( $10^{-18}$ Ф)
4	Зміна ємності, що відповідає зміні прискорення в повному діапазоні	0,01 пФ
5	Відстань між електродами конденсатора	1,3 мкм
6	Мінімальне розрізнення відхилення рухомих електродів конденсатора	0,2 ангстрема (0,2 від діаметра атома)

### 2.1.1 Математичні та електричні моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра

Мікромеханічні акселерометри на сьогодні знаходять все більш широке застосування у вимірвальній техніці [11–14]. Сучасні нанотехнології обробки матеріалів дозволяють виготовляти акселерометри в інтегральному виконанні з надзвичайно малими габаритами та низькою собівартістю, що суттєво розширює область їхнього застосування. В першу чергу це стосується енергетики, транспорту, медицини, промислових систем вимірювання та контролю, систем навігації тощо.

Однак, як свідчить аналітичний огляд супровідної технічної документації та науково-технічної літератури [11, 12, 14], запропоновані вище математичні моделі, які описують цей різновид акселерометрів, є або доволі наближеними і неточними, або за певних умов навіть і

хибними. Крім того їхня сфера застосування тільки статичні вимірювання, що ніяким чином не відноситься до вібраційного моніторингу – динамічних вимірювань.

Враховуючи пов'язані з цим ймовірні негативні наслідки, які можуть статися під час функціонування складних і, головне, критичних до цього систем (наприклад, при моніторингу рівня вібрацій на турбінах гідроелектростанцій), наразі постає важлива і актуальна задача розробки більш точних математичних моделей означених акселерометрів.

Серед провідних компаній, які здійснюють розробку та виробництво інтегральних акселерометрів, доволі помітною є Analog Devices [14]. В даний час ця компанія виготовляє сімейство мікромеханічних ємнісних акселерометрів ADXLxxx поверхневої конструкції, які мають переваги над акселерометрами інших типів.

Уточнену математичну модель розробимо на основі акселерометра ADXL50. Кожна із 54 однакових ланок цього сенсора являє собою сукупність штучної наперед відомої інерційної маси, яка з двох кінців через пружні розтяжки опирається на стовпчики-анкери, та диференціальній конденсаторній структурі з повітряним діелектриком (рис. 2.2), електрична ємність якої зазнає змін, коли інерційна маса датчика прискорення за зміни швидкості переміщення кристала і сама зміщується відносно нього.

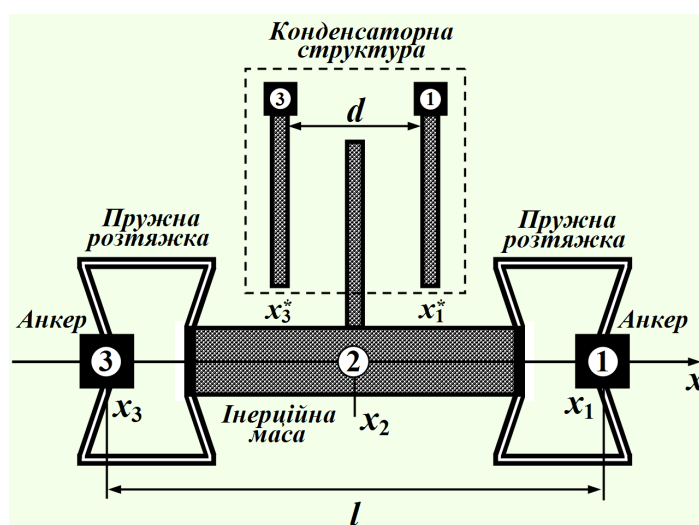


Рисунок 2.2 – Схема окремої ланки акселерометра

З рис. 2.2 видно, що в загальному випадку кількість ступенів вільності елементарної ланки сенсора як механічної системи дорівнює трьом. Але через існуючу в'язь між анкерами, відстань між якими є постійною, це число можна звести до двох. Розглянемо це докладніше.

### 2.1.1.1 Уточнені математична та електрична моделі мікро-механічного ємнісного акселерометра

Для побудови уточненої математичної моделі скористаємося теорією Лагранжа [15] та теорією динамічних аналогій (методом електромеханічних аналогій) [16, 17].

Відповідно до першої теорії, рівняннями руху елементарної ланки є рівняння Лагранжа II роду [18]:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right] = Q_s - \frac{\partial \Pi}{\partial x_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_s}, \quad s = 1, 2, 3, \quad (2.4)$$

де  $\Pi$  – потенціальна енергія елементарної ланки;  $\Phi$  – дисипативна функція Релея елементарної ланки.

В рівняннях (2.4) враховано ту обставину, що кінетична енергія  $T$  цієї системи залежить від узагальнених швидкостей обох анкерів ( $\dot{x}_1$ ,  $\dot{x}_3$ ) та інерційної маси  $\dot{x}_2$  і не залежить від їхніх узагальнених координат  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , тобто

$$\frac{\partial T}{\partial x_s} = 0, \quad s = 1, 2, 3.$$

Це дозволяє скористатися першою системою динамічних аналогій (аналогій типу «сила–напруга») [16] і поставити у відповідність системі диференціальних рівнянь (2.5) як аналогію рівняння Лагранжа–Максвелла

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial W_m}{\partial i_s} \right] = e_s - \frac{\partial W_e}{\partial q_s} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial \dot{i}_s}, \quad s = 1, 2, 3, \quad (2.5)$$

де  $W_m$  – енергія магнітного поля електричної моделі елементарної ланки акселерометра;  $W_e$  – енергія її електричного поля;  $\Phi_e$  – електрична дисипативна функція Релея;  $e_s$  – контурні електрорушійні сили;  $i_s = \dot{q}_s$  – контурні струми електричної моделі.

Електричну схему моделі (2.5) побудуємо на основі загальних схем з довільним ступенем вільності, які були запропоновані в роботі [17], попередньо провівши при цьому лінеаризацію механічної системи елементарної ланки акселерометра. Необхідно зауважити, що вищезначена лінеаризація є цілком припустимою, через слабку нелінійність в робочій області значень узагальнених координат та узагальнених швидкостей.

Схему заміщення електричної моделі наведено на рис. 2.3а [19].

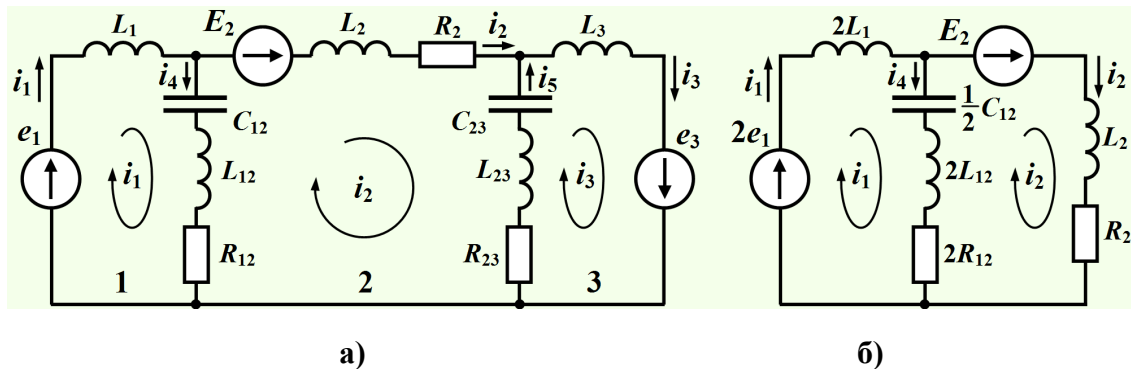


Рисунок 2.3 – Схема електричної моделі окремої ланки акселерометра

В цій схемі враховано найбільш суттєві фізичні явища, які спостерігаються в схемі акселерометра і пов'язані з перетвореннями енергій. До таких явищ віднесено в першу чергу:

- перетворення частини кінетичної енергії  $T$  в інерційній масі  $m_2$  (або частини магнітної енергії  $W_m$  в індуктивному елементі  $L_2$  електричної моделі);

- перетворення частини потенціальної енергії  $\Pi$  в пружних розтяжках з коефіцієнтами жорсткості  $\zeta_{12}$ ,  $\zeta_{23}$  (або частини електричної енергії  $W_e$  в ємнісних елементах  $C_{12}$ ,  $C_{23}$ );

- дисипацію енергії у випадку деформації пружних розтяжок та руху інерційної маси, ввівши для цього коефіцієнти розсіювання  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{23}$  та  $\beta_2$  (або розсіювання енергії електричного струму на активних опорах  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  електричної моделі, в одному випадку, та на активному опорі  $R_2$  – в іншому);

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левицький А. С. Створення ємнісного вимірювального перетворювача зазору між ротором та статором у потужних гідроагрегатах / А. С. Левицький, А. І. Новіков, Є. Ю. Неволюбов // Електронний ресурс – Режим доступу: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/63878/07-Levitsky.pdf?sequence=1>.
2. Вибрация и вибродиагностика судового електрооборудования / А. А. Александров, А. В. Барков, Н. А. Баркова, В. А. Шафранский. – Л. : Судостроение, 1986.
3. Барков А. В. Диагностирование и прогнозирование состояния подшипников качения по сигналу вибрации / А. В. Барков // Судостроение. – 1985. – № 3. – С. 21–23.
4. Баркова Н. А. Виброакустические методы диагностики СЭУ : учебное пособие. / Н. А. Баркова. – Ленинград : Ленинградский кораблестроительный институт, 1986.
5. Барков А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – Л. : ВАСТ, 1997. – 170 с.
6. Блаттер К. Вэйвлет-анализ. Основы теории. / К. Блаттер. – М. : Техносфера, 2004. – 280 с.
7. Моніторинг, діагностування, та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Г. Мадьяров та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 168 с.
8. Воронцов О. Г. Метод повышения достоверности вибродиагностики роторных машин по комплексу диагностических параметров / О. Г. Воронцов // Електротехніка і енергетика : наукові праці Донецького державного технічного університету. – Донецьк : РВА ДонДТУ – 2002. – Вип. 38. – С. 250–256.
9. Ширман А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М., 1996. – 276 с.
10. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций : справочное пособие. В 2 т. – Том 1. Основное оборудование гидроэлектростанций / под редакцией Ю. С. Васильева, Д. С. Шавельева. – М. : Энергоатомиздат, 1988 – 40 с.

11. Аш Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Аш – Москва : Мир, 1992. – 424 с.
12. Фрайден Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – Москва : Техносфера, 2005. – 592 с.
13. Кухарчук В. В. Элементы теории контроля динамических параметров электрических машин : монография / В. В. Кухарчук. – Винница : Универсум-Винница, 1998. – 125 с.
14. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под. ред. Б. С. Алешина, К. К. Веременико, А. И. Черноморского. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с.
15. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник / М. А. Павловський. – 2-ге видання, стер. – Київ : Техніка, 2004. – 512 с.
16. Ведміцький Ю. Г. Элементы теории электродинамического моделирования вимірювального перетворення і контролю моменту інерції. Проблематика, динамічні аналогії та принцип дуальності / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5(80). – С. 25–30.
17. Ведміцький Ю. Г. Вимірювальне перетворення і контроль моменту інерції механічних та електромеханічних систем в процесі їх експлуатації. Теорія і практика / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 4(113). – С. 47–55.
18. Потапов Л. А. Испытание микроэлектродвигателей в переходных режимах / Л. А. Потапов, В. Ф. Зотин – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 104 с.
19. Микропроцессорный регистратор быстропротекающих процессов / В. Т. Маликов, В. А. Поджаренко, В. В. Кухарчук и др. // Радиотехника. – 1985. – Т.3. – С. 104–111.
20. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле : підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 407 с.
21. Кухарчук В. В. Метод аналітичного розрахунку віброшвидкості у режимі розгону гідроагрегату / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк, Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – № 2. – С. 66–70.

22. New non-system physical quantities for vibration monitoring of transient processes at hydropower facilities, integral vibratory accelerations / Y. G. Vedmitskyi, V. V Kukharchuk, V. F. Hraniak and other // Przegląd elektrotechniczny – 2017. – № 3. – P. 69–72.

23. Кухарчук В. В. Математична модель мікропереміщень оптико-цифрового сенсора / В. В. Кухарчук, В. Й. Білинський // Вісник інженерної академії наук. – 2009. – № 1. – С. 103–107.

24. Кухарчук В. В. Уточнені математичні і електричні моделі позиційно-чутливих детекторів / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної Академії України. – 2010. – № 3. – С. 57–62.

25. Гаврилець Г. О. Моделювання вібрацій в електромеханічній системі з асинхронним двигуном. Електронний ресурс. – Режим доступу: <http://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2013/04/533.pdf>.

26. Патент 105180 Україна МПК G 01 N 7/00. Інтелектуальний засіб вимірювання віброприскорення / Кухарчук В. В., Мадьяров В. Г., Ніколаєв В, Я. та ін., заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – заявл. 10.08.2015 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. – 6 с.

27. Кухарчук В. В. Принципи побудови штучної нейронної мережі системи автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Г. Мадьяров // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 1 (23). – С. 42–47.

28. Воронцов О. Г. Розробка методу віброакустичної діагностики тихохідних роторних машин / О. Г. Воронцов, І. В. Дегтяренко // Обчислювальна техніка та автоматизація : наукові праці Донецького державного технічного університету. – Донецьк : РВА ДонДТУ. – 2002. – Вип. 41. – С. 212–215.

29. Ідентифікація електродинамічної складової амплітудно-частотно-часового спектру вібросигналу в режимі короткого замикання за допомогою штучної нейроподібної мережі / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, І. К. Говор, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2013. – № 2. – С. 271–275.

30. Каців С. Ш. Підхід до прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату на основі використання штучної нейронної мережі / С. Ш. Каців // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 1. Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/20121/2012-1.files/uk/12sskann\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/20121/2012-1.files/uk/12sskann_ua.pdf).

31. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
32. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
33. Кухарчук В. В. Частотно-часовий аналіз вібросигналів з використанням вейвлет-перетворень / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 2(16). – С. 39–42.
34. Аналіз вібросигналів гідроагрегату за допомогою дискретного вейвлет-перетворення з коефіцієнтом стискання 2 / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, І. К. Говор, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2011. – № 1. – С. 124–129.
35. Тарасов А. А. Физические процессы в гидрогенераторах с реактивной турбиной [Электронный ресурс] / А. А. Тарасов. – Режим доступа: <http://diamech.ru/notes03112009.html>.
36. Кацев С. Ш. Штучна нейроподібна мережа для діагностування дефектів гідроагрегатів / С. Ш. Кацев // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – № 1. – С. 74–83.
37. Иванов Б. Н. Мир физической гидродинамики. От проблем турбулентности до физики космоса / Б. Н. Иванов. – М. : Стереотип, 2018. – 240 с.
38. Пакет прикладных программ для балансировки роторов в собственных опорах. Инструкция по эксплуатации. – СПб. : ВАСТ, 1993. – Ч. 3.
39. Система автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідрогенераторів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, І. К. Говор [та ін.] // Вісник Інженерної Академії України. – 2009. – № 2. – С. 126–132.
40. Дослідження результатів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналу при коефіцієнті стискання 2 та різних материнських вейвлетах / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, В. Г. Мадьяров, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2011. – № 2. – С. 66–69.
41. Кухарчук В. В. Оцінка ефективності алгоритмів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналів з різними коефіцієнтами стискання / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 4. – С. 151–154.



42. Зажицкий А. В. Классификация состояния объекта виброакустической диагностики с использованием нейротехнических структур / А. В. Зажицкий, Н. И. Бурау, А. Н. Тяпченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Харків, 2002. – Вип. 31. – С. 181–185.

43. Пакет прикладных программ для диагностирования и прогнозирования состояния подшипников качения. Инструкция по эксплуатации. – СПб. : ВАСТ, 1992. – Ч. 3, 4.

44. Порівняльний аналіз результатів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналів з довільними цілими коефіцієнтами стискання / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, І. К. Говор, С. О. Биковський // *Вісник Інженерної Академії України*. – 2011. – № 2. – С. 172–176.

45. Мокін Б. І. Оптимізація електроприводів : навчальний посібник / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2004. – 250 с.

46. Broersen P. M. T. Automatic autocorrelation and spectral analysis / P. M. T. Broersen. – Springer-Verlag London Limited, 2006 – 298 p.

47. Bilosova A. Vibration diagnostic / A. Bilosova, J. Bilos. – Ostrava, 2012. – 114 p.

48. Патент 102223 Україна МПК G 01 N 7/00, 7/02. Система для вимірювання і контролю параметрів вібрації електричних машин / Кухарчук В. В., Мадьяров В. Г., Ніколаєв В. Я. та ін., заявник і власник патенту Товариство з обмеженою відповідальністю «Укренергомаш-інжиніринг» ; заявл. 01.04.2015 ; опубл. 26.10.2015, Бюл. №20. – 5 с.

Ronney P. D. Basics of mechanical engineering / P. D. Ronney. – Los Angeles : Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Southern California, 2005. – 128 p.

49. Патент 102700 Україна МПК G 01 N 7/00, 7/02. Система для вимірювання і контролю параметрів вібрації електричних машин / Кухарчук В. В., Мадьяров В. Г., Ніколаєв В. Я. та ін., заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет ; заявл. 02.06.2015 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21 – 5 с.

50. Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machines / V. F. Hraniak, V. V. Kukharchuk, V. Kucheruk, A. Khassenov // *Bulletin of the Karaganda University: PHYSICS Series*. – 2018. – № 1 (89). – P. 72–80.

51. Дремин И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465–501.
52. Чуи Ч. Введение в вейвлеты / Ч. Чуи. – М. : Мир, 2001. – 412 с.
53. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 671 с.
54. V. V. Kukharchuk Diagnostics and forecasting of hydro units faults / V. V. Kukharchuk, S. Sh. Kazyv // Khoa hoc & Công nghệ. – 2012. – № 8 (57). – P. 122–126.
55. Граняк В. Ф. Результаты аналізу залежності коефіцієнтів взаємкореляції вібраційних процесів гідроагрегату від його навантаження / В. Ф. Граняк, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 4. – С. 7–14.
56. Кухарчук В. В. Застосування вейвлет-перетворень в задачах моніторингу та вібродіагностування машин та обладнання [Електронний ресурс] / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 3. – Режим доступу до журн. : [http:// www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-3/2009-3.htm](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-3/2009-3.htm).
57. Кухарчук В. В. Частотна ідентифікація масштабних коефіцієнтів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2012. – № 1. – С. 138–142.
58. Горбань А. Н. Нейронные сети на персональном компьютере. / А. Н. Горбань, Д. А. Россиев. – Новосибирск : Наука, 1996. – 276 с.
59. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
60. Зажицький О. Аналіз ефективності розпізнавання технічного стану об'єкта віброакустичної діагностики нейронними мережами / Олександр Зажицький, Надія Бурау // Методи та прилади контролю якості. – 2003. – № 11. – С. 21–26.

*Наукове видання*

**Кухарчук Василь Васильович  
Граняк Валерій Федорович  
Каців Самоїл Шулімович  
Мадьяров В'ячеслав Губейович**

**ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ГІДРОАГРЕГАТІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Граняком

Системні вимоги:

процесор Pentium; 512 Mb RAM;

Windows XP,7,8,10; Acrobat Reader 6.0+.

Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 2,75 Мб.

Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2019-02

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,

Інформаційний редакційно-видавничий центр.

Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,

м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.

[press.vntu.edu.ua](http://press.vntu.edu.ua); *email*: [kivc.vntu@gmail.com](mailto:kivc.vntu@gmail.com).

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/516>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>