

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

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

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2019

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 нейроподібна 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 нестаціонарним, 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.

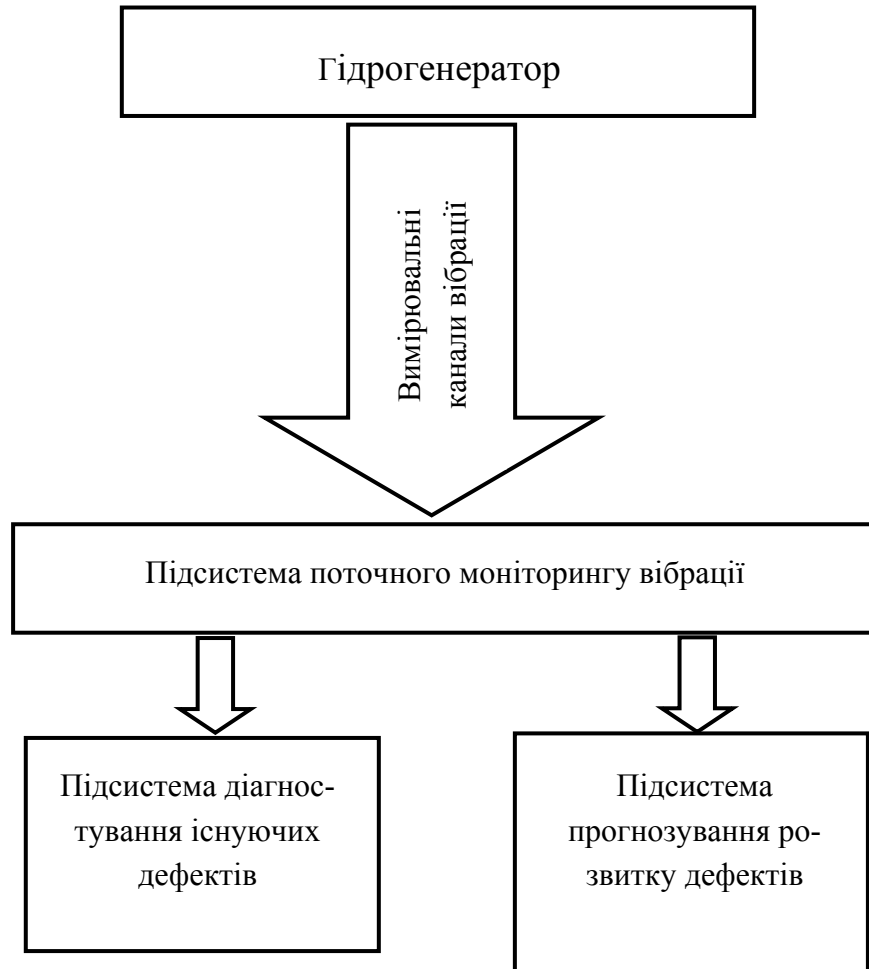


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема САДП-РДГ

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

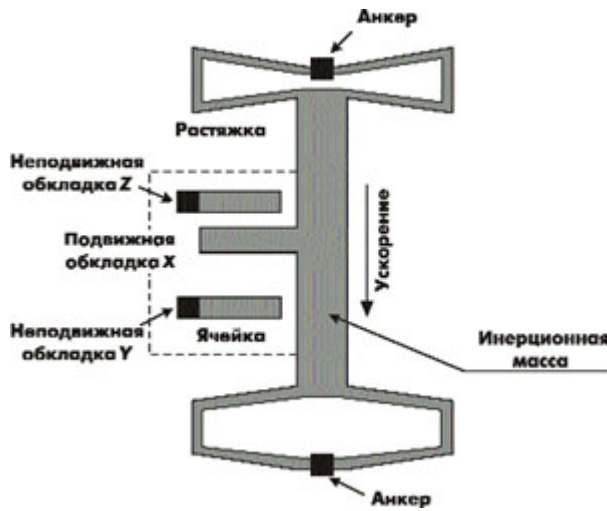


Рисунок 2.1 – Структурна схема емнісного акселерометра

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

$$F = ma \tag{2.1}$$

врівноважується силою пружини

$$F = kx, \tag{2.2}$$

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

Прирівнявши силу інерції і силу протидії, отримаємо

$$a = \frac{k}{m}x = S_a \cdot x. \tag{2.3}$$

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 диференціальної конденсаторної структури 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.

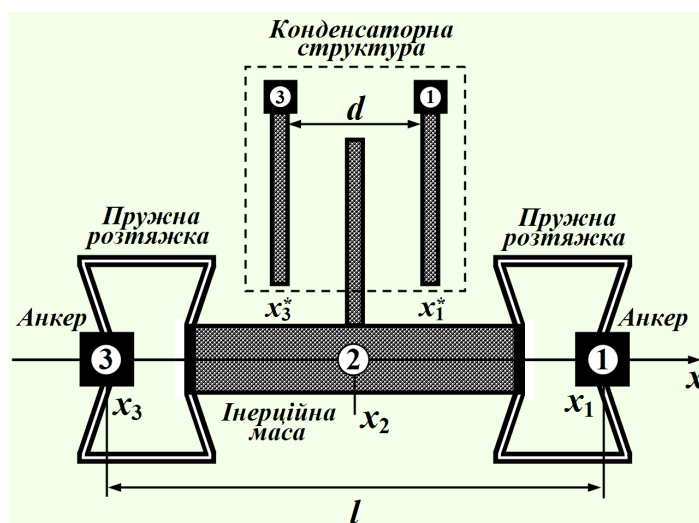


Рисунок 2.2 – Схема окремої ланки акселерометра

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].

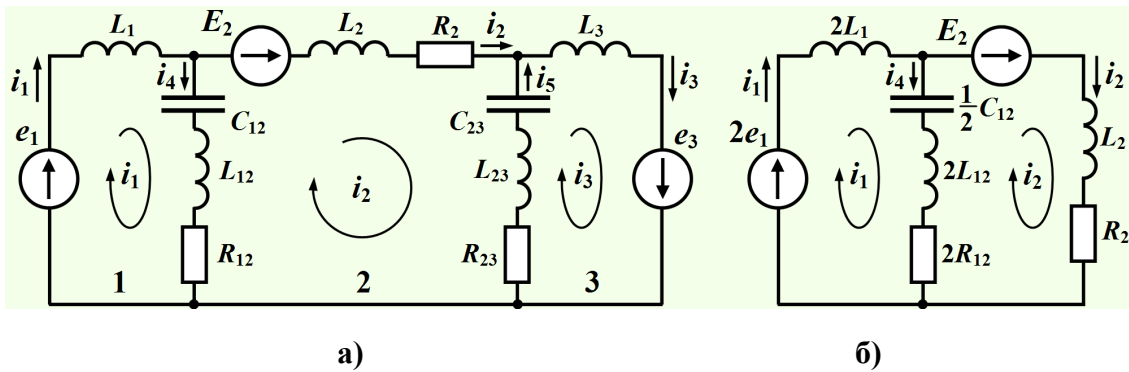


Рисунок 2.3 – Схема електричної моделі окремої ланки акселерометра

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);

- перетворення частини кінетичної енергії  $T$  сенсора за рахунок руху анкерів  $m_1$  і  $m_3$  та руху обох пружних розтяжок  $m_{12}$ ,  $m_{23}$  під час їхньої деформації (або частини магнітної енергії  $W_m$  в індуктивних елементах, в одному випадку,  $L_1$  і  $L_3$ , а в іншому –  $L_{12}$ ,  $L_{23}$  електричної моделі),

а також:

- дію постійної зовнішньої сили земного тяжіння у випадку розташування сенсора під кутом  $\alpha$  до горизонту  $F_2 = m_2 g \sin \alpha$  (або дію постійного зовнішнього джерела е. р. с.  $E_2$  в другому незалежному контурі електричної моделі);

- дію змінної у часі зовнішньої сили  $F_1$ , прикладеної до корпусу акселерометра, яка і викликає зміну його швидкості (або дію зовнішніх джерел змінної е. р. с.  $e_1 = e_3$  в першому та третьому контурах відповідно).

Неважко показати, що, склавши на основі законів Кірхгофа для даного кола (див. рис. 2.3а) систему диференціальних рівнянь, останню можна суттєво спростити, якщо тільки врахувати в'язь накладену на ланку механічної системи, а саме  $x_1 - x_3 = const$ , звідки  $\dot{x}_1 = \dot{x}_3$ . Електричним аналогом цієї в'язі буде умова:  $i_1 = i_3$ , за виконання якої система диференціальних рівнянь, складена за законами Кірхгофа, набуде вигляду:

$$\begin{cases} -i_1 + i_2 + i_4 = 0, \\ 2L_1 \frac{di_1}{dt} + u_{C_{12}} + 2L_{12} \frac{di_4}{dt} + 2R_{12}i_4 = 2e_1, \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2i_2 - 2R_{12}i_4 - 2L_{12} \frac{di_4}{dt} - u_{C_{12}} = E_2, \\ i_4 = \frac{C_{12}}{2} \frac{du_{C_{12}}}{dt}, \end{cases} \quad (2.6)$$

внаслідок чого і сама схема електричної моделі (див. рис. 2.3а) зазнає суттєвих еквівалентних спрощень, утворивши систему з двома ступенями вільності (див. рис. 2.3б). Рівняння (2.6) записано в результаті припущення ідентичності фізичних властивостей як обох анкерів, так і обох пружних розтяжок, закріплених на них, а також тієї обставини,

що зовнішня сила, яка діє на датчик, прикладається і до першого анкера, і до другого водночас.

Із системи рівнянь (2.6) безпосередньо випливає

$$\begin{cases} \left( C_{12}(L_1 + L_{12}) \frac{d^2 q_1}{dt^2} + C_{12}R_{12} \frac{dq_1}{dt} + q_1 \right) - \left( C_{12}L_{12} \frac{d^2 q_2}{dt^2} + C_{12}R_{12} \frac{dq_2}{dt} + q_2 \right) = C_{12}e_1, \\ \left( C_{12}L_{12} \frac{d^2 q_1}{dt^2} + C_{12}R_{12} \frac{dq_1}{dt} + q_1 \right) - \left( \frac{C_{12}(L_2 + 2L_{12})}{2} \frac{d^2 q_2}{dt^2} + \frac{C_{12}(R_2 + 2R_{12})}{2} \frac{dq_2}{dt} + q_2 \right) = -\frac{C_{12}}{2} E_2, \end{cases} \quad (2.7)$$

де контурні струми записано через похідні  $i_1 = \frac{dq_1}{dt}$ ,  $i_2 = \frac{dq_2}{dt}$ .

Тоді, відповідно до теорії динамічних аналогій, на підставі системи (2.7), враховуючи, що у стані спокою  $x_1 = x_2 + 0,5l$ , рівняння руху механічної частини окремої ланки акселерометра можуть бути записані таким чином:

$$\begin{cases} \left( \frac{m_1 + m_{12}}{\zeta_{12}} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{\beta_{12}}{\zeta_{12}} \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right) - \left( \frac{m_{12}}{\zeta_{12}} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{\beta_{12}}{\zeta_{12}} \frac{dx_2}{dt} + x_2 \right) = \frac{F_1}{\zeta_{12}}, \\ \left( \frac{m_{12}}{\zeta_{12}} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{\beta_{12}}{\zeta_{12}} \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right) - \left( \frac{m_2 + 2m_{12}}{2\zeta_{12}} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{\beta_2 + 2\beta_{12}}{2\zeta_{12}} \frac{dx_2}{dt} + x_2 \right) = \frac{l}{2} - \frac{m_2 g \sin \alpha}{2\zeta_{12}}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Як було вище зазначено, за зміни координати  $x_2$  пластина інерційної маси (див. рис. 2.2) відносно нерухомих до анкерів пластин з координатами  $x_1^* = x_1 - 0,5(l-d)$  та  $x_3^* = x_1 - 0,5(l+d)$ , зміни зазнають електричні ємності  $C_{12}^*$  та  $C_{23}^*$  конденсаторної структури механічної ланки датчика (не плутати з ємностями  $C_{12}$  і  $C_{23}$  електричної моделі).

Відповідно до [20], ємності  $C_{12}^*$  та  $C_{23}^*$  залежать від площі  $S$  перекриття конденсаторних пластин та відстаней між ними, тобто

$$C_{12}^* = \frac{\varepsilon_0 S}{x_1^* - x_2} = \frac{\varepsilon_0 S}{(x_1 - x_2) - 0,5(l-d)}, \quad (2.9)$$

$$C_{23}^* = \frac{\varepsilon_0 S}{x_2 - x_3^*} = \frac{\varepsilon_0 S}{0,5(l+d) - (x_1 - x_2)},$$

де  $\varepsilon_0 = (4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)^{-1} \frac{\Phi}{m}$  – електрична стала.

Таким чином, система диференціальних рівнянь (2.8) в сукупності з рівняннями (2.9), являють собою уточнену загальну математичну модель окремої ланки механічної частини досліджуваних інтегральних акселерометрів. Інші ланки цих акселерометрів є ідентичними і незалежними одна від одної, що дозволяє загальну математичну модель всієї системи сенсора подати на основі рівнянь (2.8) та (2.9).

### 2.1.1.2 Спрощені математична та електрична моделі мікро-механічного ємнісного акселерометра

Отримана вище уточнена математична модель внаслідок своєї узагальненості може бути покладена в основу розробки спрощених або наближених математичних моделей, коли окремими фізичними явищами, які під час руху спостерігаються в акселерометрі, внаслідок їх другорядності порівняно з іншими можна знехтувати. Тому спрощену (наближену) математичну модель механічної ланки акселерометра отримаємо на підставі рівнянь (2.8) і (2.9).

З огляду на ті спрощення, які пропонує вносити в математичні моделі виробник цих акселерометрів, подамо окремі коефіцієнти другого рівняння системи (2.8) (через їх порівняну малість) такими, що дорівнюють нулю. Тоді це рівняння можна записати у вигляді

$$x_1 = \frac{m_2}{2\zeta_{12}} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + x_2 + \frac{l}{2} - \frac{m_2 g}{2\zeta_{12}} \quad (2.10)$$

для вертикального ( $\alpha = 90^\circ$ ) розташування акселерометра та у вигляді

$$x_1 = \frac{m_2}{2\zeta_{12}} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + x_2 + \frac{l}{2} \quad (2.11)$$

для розташування на горизонтальній поверхні ( $\alpha = 0$ ).

Для прикладу на рис. 2.4 наведено еквівалентну схему електричної моделі для останнього випадку.

Спочатку необхідно зробити такі важливі зауваження.

З рівнянь (2.11) та (2.9) випливає, що

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{2\zeta_{12}}{m_2} [(x_1 - x_2) - 0,5l] = \frac{\zeta_{12}}{m_2} \left( \frac{2\varepsilon_0 S}{C_{12}^*} - d \right). \quad (2.12)$$

Як свідчить огляд окремих літературних джерел рівняння перетворення помилково формують безпосередньо на підставі рівняння (2.2), маючи на увазі, що перетворюваним в ємність  $C_{12}^*$  прискоренням є друга похідна за часом координати  $x_2$ . Насправді ж це є прискорення інерційної маси сенсора  $a_2 = \frac{d^2 x_2}{dt^2}$ , але аж ніяк не самого датчика!

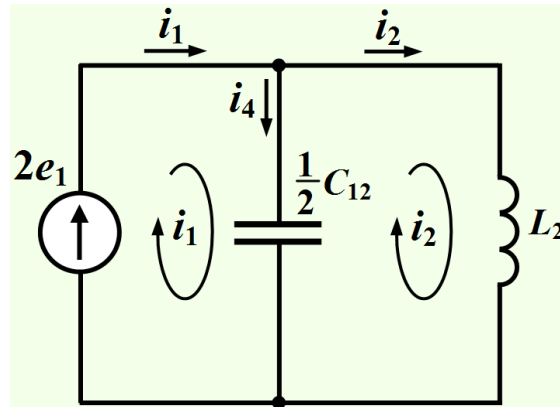


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема спрощеної моделі

Для самого ж датчика прискоренням буде прискорення нерухомих до нього анкерів, тобто  $a_1 = \frac{d^2 x_1}{dt^2}$ , тож отримаємо

$$a_1 = \frac{m_2}{2\zeta_{12}} \frac{d^2 a_2}{dt^2} + a_2, \quad (2.13)$$

звідки видно, що  $a_1 \neq a_2$  і визначення  $a_1$  безпосередньо за формулою (2.1) є хибним.

Із співвідношення (2.13) випливає, що тільки в окремих випадках можна вважати що  $a_1 \approx a_2$  із можливістю застосування безпосередньо формули (2.13). У випадку ж складного руху (наприклад, у випадку дослідження вібрацій об'єктів обертання), коли друга похідна  $\frac{d^2 a_2}{dt^2}$  набуває доволі суттєвих значень, потрібно використовувати рівняння (2.12) і (2.13) в сукупності, підставляючи одне в інше, навіть якщо при цьому інший множник в другій складовій  $\frac{m_2}{2\zeta_{12}}$  буде надзвичайно малим.



На основі варіаційних принципів аналітичної механіки та за допомогою теорії динамічних аналогій розроблено уточнені загальні математичну й електричну моделі механічної частини мікромеханічних ємнісних акселерометрів компанії Analog Devices, які враховують найбільш суттєві фізичні явища, що спостерігаються в акселерометрах під час його руху, і пов'язані з перетвореннями механічної енергії.

На базі пропонованих загальних моделей для окремих поширених випадків отримано спрощені (наближені) математичну й електричну моделі, аналіз яких виявив можливі недоліки під час перетворення прискорення в електричну ємність й дозволив скорегувати існуючі та отримати уточнені математичні співвідношення.

## 2.2 Засоби вимірювання вібрації

Основними складовими сучасних засобів вимірювання вібросигналів є такі [21–23]:

- первинний вимірювальний перетворювач (сенсор), що перетворює неелектричну величину в електричну;
- фільтр, який виділяє параметри сигналів в необхідній області частот;
- аналого-цифровий перетворювач з мікропроцесором (мікроконтролер).

Ці засоби вимірювання називають вимірювальними каналами вібрацій, узагальнену структурну схему якого показано на рис. 2.5.

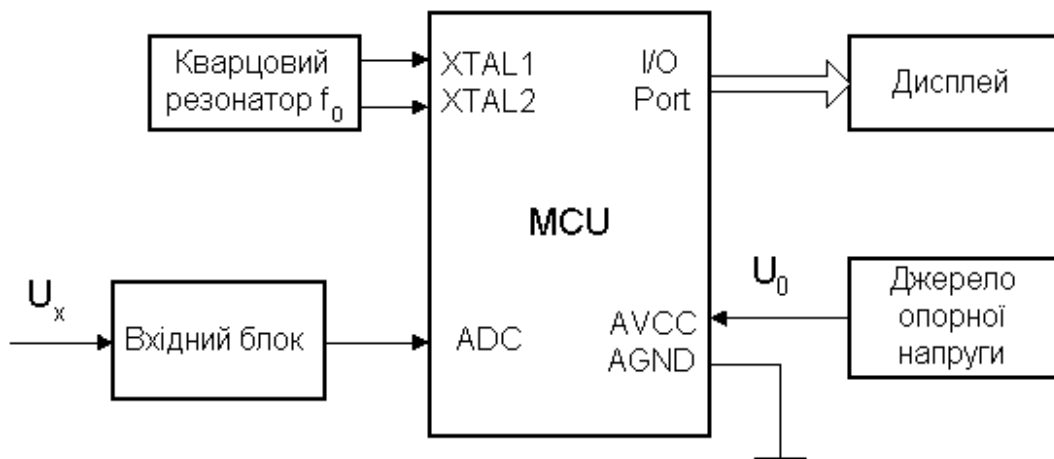


Рисунок 2.5 – Узагальнена структурна схема засобу вимірювання вібрацій

Виведемо рівняння перетворення для цього каналу.

Рівняння перетворення сенсора віброприскорення (2.14) спрощено має такий вигляд [24]

$$a = \frac{k}{m} x = S_a \cdot x. \quad (2.14)$$

В процесі вимірювання вібрацій користуються такими трьома фізичними величинами:

- віброприскорення –  $a$  [м/с<sup>2</sup>];
- віброшвидкість –  $v$  [мм/с];
- віброзміщення –  $S$  [мкм].

В низькочастотній області коливань пріоритет віддають віброзміщенням, а у високочастотній – віброприскоренням. Знайдемо співвідношення між цими фізичними величинами.

### **2.2.1 Метод вилучення гравітаційної похибки засобу вимірювання віброприскорення на основі автоматичного самокалібрування засобу вимірювання**

Особливістю існуючих сенсорів віброприскорення є вимірювання сумарного (інтегрованого) прискорення сенсора, у тому числі і тієї його складової, що обумовлюється впливом гравітаційних сил. Враховуючи це, на зазначені сенсори у вертикальному напрямку постійно діє прискорення вільного падіння  $g$  [25]. Про те, в наслідок неідеальності вертикальної установки сенсорів у реальних умовах, зазначена складова буде проектуватися на вимірювальні осі в залежності від реального кута нахилу, що буде формуватися випадково та для конкретного сенсора носитиме адитивний характер. При чому можливі зміни у часі кута нахилу окремо взятого сенсора якщо і матимуть місце, то протікатимуть доволі повільно. Тож, засоби вимірювання, що побудовані на основі зазначених первинних вимірювальних перетворювачів, міститимуть у собі гравітаційну адитивну складову похибки, що суттєво впливатиме на похибку результатів вимірювання в цілому [7].

Запропонований метод включає у себе алгоритм автоматичного самокалібрування сенсора віброприскорення перед запуском агрегату, у момент часу, коли віброприскорення з боку діагностованого обладнання близьке до нуля (ним можна знехтувати). Робота зазначеного алгоритму забезпечується шляхом вимірювання віброприскорення по

кожній з вимірювальних осей та формування на основі отриманих значень поправочних коефіцієнтів, що запам'ятовуються та автоматично вводяться у кожен результат вимірювання до виконання наступного самокалібрування.

Виходячи зі сказаного, метод вилучення гравітаційної складової похибки можна представити у вигляді алгоритму, наведеного на блок-схемі (рис. 2.6).

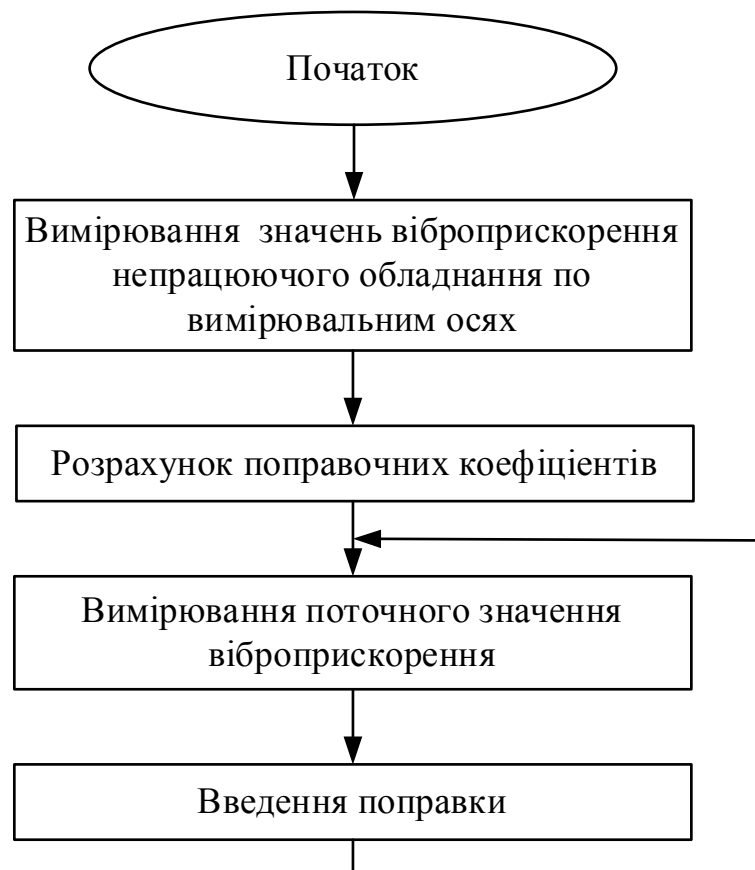


Рисунок 2.6 – Узагальнена блок-схема алгоритму вилучення гравітаційної складової похибки

### 2.2.2 Засіб, що реалізує метод вилучення гравітаційної похибки

Для реалізації методу вилучення гравітаційної похибки було запропоновано інтелектуальний засіб вимірювання віброприскорення [26], структурна схема якого представлена на рис. 2.7.

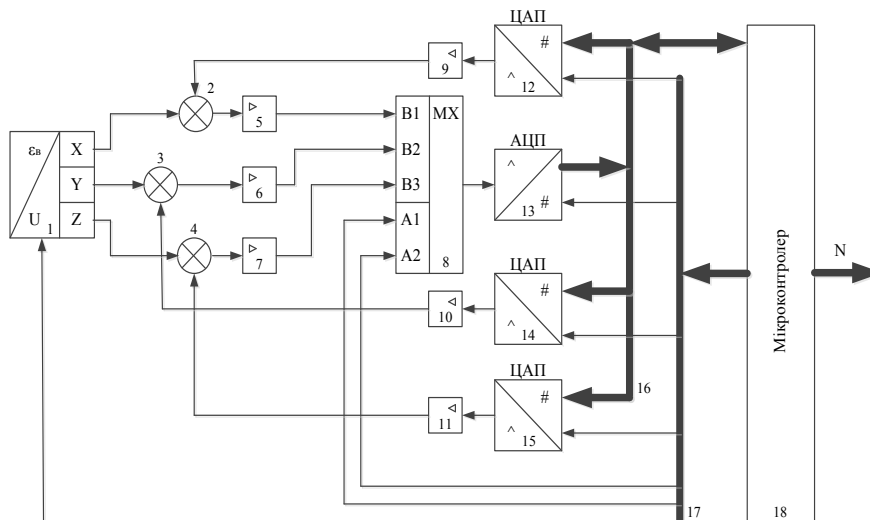


Рисунок 2.7 – Структурна схема інтелектуального засобу вимірювання віброприскорення

Пристрій, що на рис. 2.7, працює таким чином.

Вимірювання рівнів сигналів з виходів датчика віброприскорення 1.

З першого, другого та третього виходів датчика віброприскорення 1 на перші входи, відповідно, першого 2, другого 3 та третього 4 аналогових суматорів надходять сигнали, що відповідають нульовому рівню віброприскорення по трьох осях координат (X, Y, Z). В аналогових суматорах 1–3 до сигналів з виходів датчика віброприскорення додаються сигнали корекції, що надходять на другі входи аналогових суматорів 2–4. З виходів аналогових суматорів 2–4 сигнали надходять, відповідно, на входи першого 5, другого 6 та третього 7 масштабуючих підсилювачів, де приводяться до рівня, придатного для роботи аналого-цифрового перетворювача 13. З виходів першого 5, другого 6 та третього 7 масштабуючих підсилювачів сигнали подаються, відповідно, на перший, другий та третій інформативні входи аналогового мультиплексора 8. В залежності від значення цифрових сигналів, що подаються на перший та другий адресні входи аналогового мультиплексора 8 з шини керування 17, на вихід аналогового мультиплексора 8 надходить сигнал з його першого, другого чи третього інформативного входу. З виходу аналогового мультиплексора 8 сигнал надходить на перший вхід аналого-цифрового перетворювача 13, у якому, після приходу на його другий вхід з шини керування 17 сигналу запуску, відбувається аналого-цифрове перетворення сигналу, що надходить на його перший вхід. По закінченні аналого-цифрового перетворення сигнал закінчення вимірювального перетворення та отриманий числовий код через вихід аналого-цифрового перетворювача 13 надходить у

шину даних 16, звідки зчитується мікроконтролером 18 через його вхід-вихід. У мікроконтролері 18 відбуваються подальша обробка отриманого числового коду та вибір поточного режиму роботи засобу вимірювання в залежності від визначеного програмно алгоритму. Подача керуючих сигналів у шину керування 17 відбувається через перший вихід мікроконтролера 18, сигналами з якої здійснюється управління роботою пристроями засобу вимірювання.

Режим компенсації похибки, обумовленої неточністю установки датчика віброприскорення 1.

Режим компенсації похибки, обумовленої неточністю установки датчика віброприскорення 1, запускається перед початком роботи засобу вимірювання при нульовому значенні віброприскорення по всіх трьох осях координат (X, Y, Z). У цьому режимі вимірювання рівнів сигналів з виходів датчика віброприскорення 1 відбувається при нульових сигналах на других входах аналогових суматорів 2–4, відповідно до алгоритму, описаному вище. Після зчитування двійкового коду, що пропорційний сигналу на першому виході датчика віброприскорення 1 (координатна вісь X), мікроконтролером 18 здійснюється порівняння цього двійкового коду з нормованим значенням, яке відповідає половині опорної напруги аналого-цифрового перетворювача 8, та формується цифровий сигнал корекції, що через вхід-вихід мікроконтролера 18 надходить у шину даних 17, через яку надходить на перший вхід першого цифро-аналогового перетворювача 12. Після надходження на другий вхід першого цифро-аналогового перетворювача 12 сигналу запуску з шини керування 17 відбувається аналого-цифрове перетворення двійкового коду, що надійшов на його перший вхід. Аналоговий сигнал, отриманий в результаті цифро-аналогового перетворення першим цифро-аналоговим перетворювачем 12, встановлюється на його виході та зберігається доти, доки не буде вимкнено живлення чи здійснено ним нове цифро-аналогове перетворення. Сигнал з виходу першого цифро-аналогового перетворювача надходить на вхід четвертого масштабуючого підсилювача 9, де приводиться до рівня, придатного для роботи першого аналогового суматора 2. З виходу четвертого масштабуючого підсилювача 9 підсилений сигнал надходить на другий вхід першого аналогового суматора 2. Таким чином на виході першого аналогового суматора 2 встановлюється скоректований сигнал, що після підсилення у першому масштабуючому підсилювачі 5 дорівнює половині опорної напруги аналого-цифрового перетворювача 13 та не містить у собі похибки, обумовленої неточністю установки датчика віброприскорення 1.

Аналогічним чином, з допомогою другого цифро-аналогового перетворювача 14 та п'ятого масштабуючого підсилювача 10 відбувається вилучення похибки, обумовленої неточністю установки датчика віброприскорення 1 з сигналу на другому виході датчика віброприскорення 1 (координатна вісь  $Y$ ), а з допомогою третього цифро-аналогового перетворювача 15 та шостого масштабуючого підсилювача 11 відбувається вилучення похибки, обумовленої неточністю установки датчика віброприскорення 1 з сигналу на третьому виході датчика віброприскорення (координатна вісь  $Z$ ).

Режим вимірювання.

У цьому режимі відбувається безпосередньо вимірювання миттєвих значень віброприскорення. Цей режим передбачає вимірювання рівнів сигналів, пропорційних миттєвим значенням віброприскорення по координатних осях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , що надходять з виходів датчика віброприскорення 1, відповідно до алгоритму, описаному вище. Після отримання числового коду мікроконтролером 18 за відомим рівнянням перетворення ним здійснюється розрахунок поточного значення віброприскорення. Отримане значення віброприскорення виводиться через другий вихід мікроконтролера 18. Після закінчення процедури виведення отриманого значення віброприскорення в поточній координатній осі запускається вимірювання віброприскорення по наступній координатній осі. Після завершення вимірювання віброприскорення в усіх трьох координатних осях процедура вимірювання повторюється циклічно.

Режим самотестування.

У цьому режимі на вхід датчика віброприскорення 1 з шини управління 17 надходить управляючий сигнал, після подачі якого на усіх виходах датчика віброприскорення 1 встановлюються сигнали заздалегідь відомої амплітуди. Після цього відбувається вимірювання сигналів на кожному з виходів датчика віброприскорення 1 за описаним вище алгоритмом та порівняння результату вимірювання з заздалегідь відомим значенням, що повинно було встановитися після подачі сигналу на вхід датчика віброприскорення 1. У випадку, якщо ці значення не збігаються приймається рішення про збій у роботі системи, про що подається відповідний сигнал через другий вихід мікроконтролера 18. Якщо ж значення виміряного сигналу збігається з заздалегідь відомим значенням, то приймається рішення про справність роботи засобу вимірювання та засіб вимірювання вважається таким, що може продовжувати подальшу роботу.

## 3 ПІДСИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ІСНУЮЧИХ ДЕФЕКТІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ

### 3.1 Структура та принципи побудови підсистеми діагностування

Структуру підсистеми діагностування існуючих дефектів наведено на рис. 3.1 [27].



Рисунок 3.1 – Структура підсистеми 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:

1. Стеки значень вібросигналів, які підсистема моніторингу отримує з вимірювальних каналів вібрації (кількість стеків дорівнює кількості вібросенсорів). Кожне значення вібросигналу відповідає певному моменту часу.

2. Значення навантаження гідрогенератора для кожного моменту часу.

3. Значення напору води для кожного моменту часу.

Далі стеки значень вібросигналів за допомогою дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) перетворюються в амплітудно-частотно-часовий спектр (АЧЧС).

АЧЧС кожного вібросигналу разом зі значеннями навантаження гідрогенератора та напору води надходять в сформовану завчасно ШНМ де виконується діагностування існуючих дефектів гідроагрегату.

Побудову ШНМ і процедури діагностування розглянемо детальніше.

### **3.2 Штучна нейроподібна мережа для діагностування існуючих дефектів гідроагрегатів**

Як вже говорилося раніше, 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 [28].

Тому доцільно розглядати гідроагрегат як «чорну скриньку», тобто моделювати не його структуру, а зовнішнє функціонування.

Таким чином, для діагностування дефектів гідроагрегату в САДП-РДГ передбачено побудову ШНМ.



### ***Основні принципи побудови ШНМ САДП-РДГ для діагностування існуючих дефектів гідроагрегату***

Для побудови ШНМ необхідно спочатку визначити, яка інформація може надходити на вхід ШНМ і що ми бажаємо отримати в результаті її функціонування.

Нагадаємо, що складовою частиною САДП-РДГ є вимірювальні канали, які забезпечують отримання віброакустичних сигналів (віброприскорення) від вібросенсорів (акселерометрів).

Зазвичай, вібросенсори розташовуються в радіальних вертикальному і горизонтальному напрямках на підшипниках, корпусі статора та інших місцях гідроагрегату [29].

Наприклад, на горизонтальних гідроагрегатах Дністровської ГЕС-2 (рис. 3.2) вібросенсори встановлені на опорно-упорному та турбінному підшипниках.

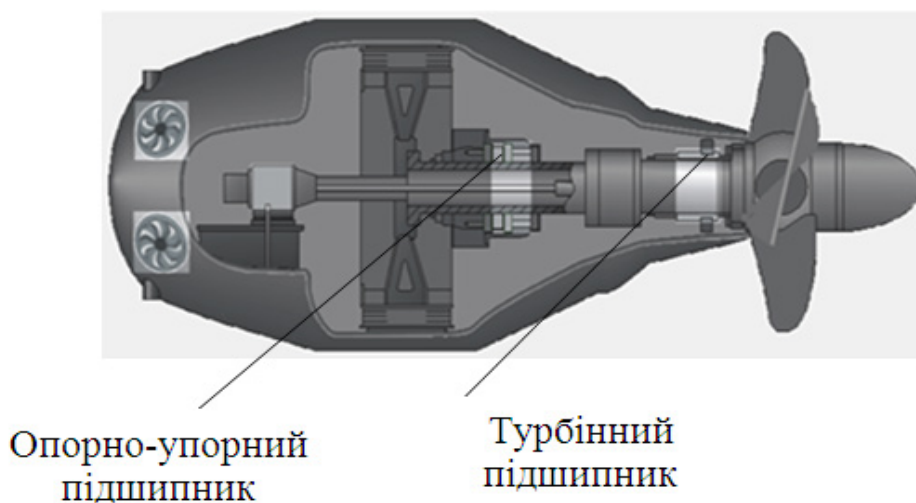


Рисунок 3.2 – Горизонтальний гідроагрегат Нижньодністровської ГЕС

На гідроагрегатах Дністровської ГАЕС (рис. 3.3) вібросенсори встановлені на:

- генераторному та турбінному підшипниках;
- кришці турбіни;
- лобових частинах обмотки статора.

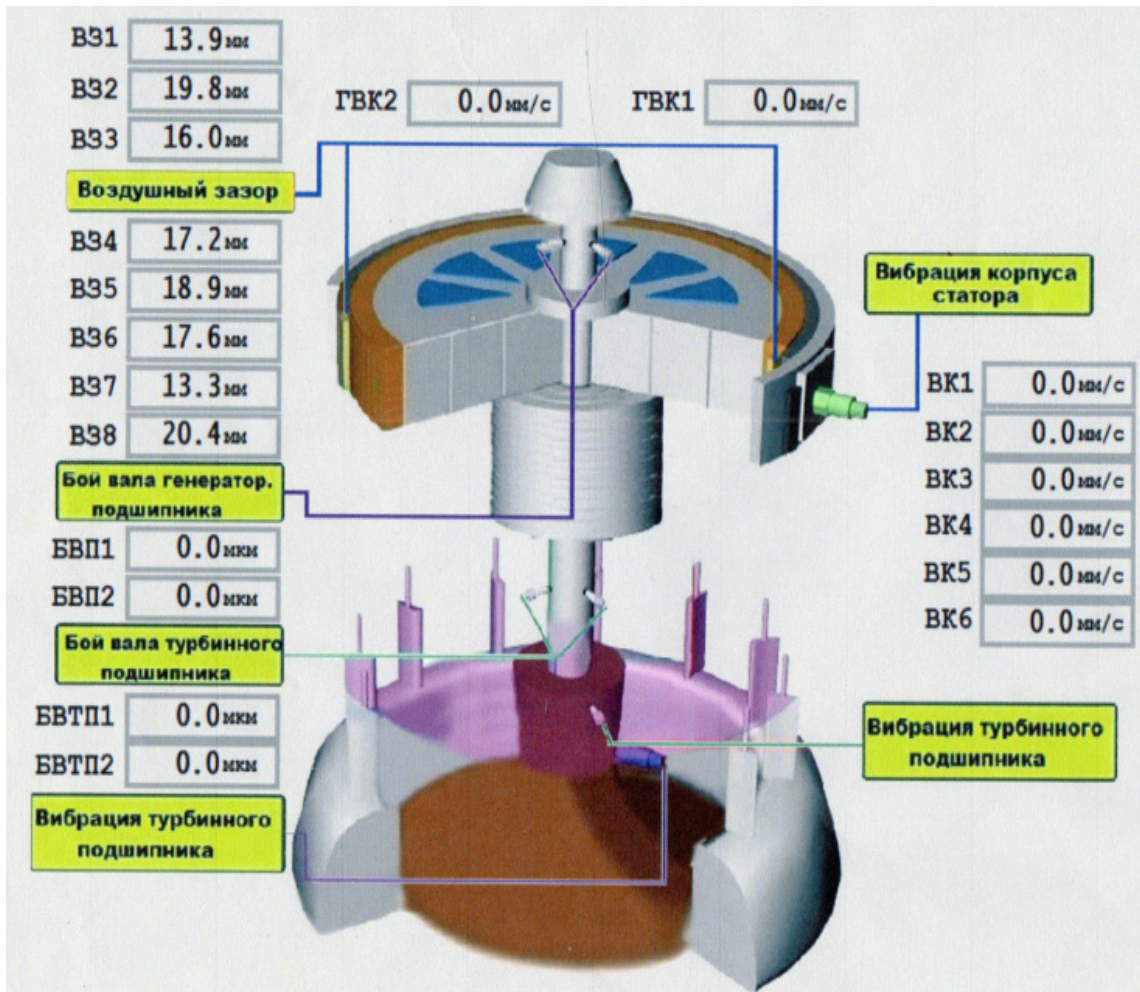


Рисунок 3.3 – Вертикальний гідроагрегат Дністровської ГАЕС

Додатково до віброакустичних сигналів САДП-РДГ отримує дані про потужність навантаження та частоту обертів гідроагрегату, а також рівень води у водосховищі (для ГАЕС – рівні води у нижньому водосховищі та верхньому акумулюючому басейні).

Ці дані надходять до підсистеми поточного моніторингу САДП-РДГ звідки, після первинної обробки, передаються у підсистеми діагностування та прогнозування.

Кожен з отриманих віброакустичних сигналів за допомогою ДВП розкладається в АЧЧС.

Отже, на вхід ШНМ мають надходити такі дані [30, 31]:

- всі значення віброзміщення, що перевищують припустиму норму, по кожному вібросенсору за певний інтервал часу з часовою фіксацією цих значень;

- АЧЧС, що відповідають кожному з згаданих вище віброакустичних сигналів за цей же інтервал часу;
- значення потужності навантаження гідрогенератора за цей же інтервал часу з часовою фіксацією;
- значення рівня води за цей же інтервал часу з часовою фіксацією.

Діагностичний блок САДП-РДГ повинен спрацьовувати тоді, коли максимум віброзміщення хоча б для одного вібросигналу перевищує допустиме значення (160 мкм).

В цьому випадку мають бути визначені ті смуги частот у відповідному АЧЧС, вейвлет-коефіцієнти яких є найбільшими в спектрі і на основі цієї інформації треба діагностувати одну чи декілька причин виникнення неприпустимого віброзміщення [32].

Розглянемо це питання детальніше.

### *Загальна структура ШНМ САДП-РДГ для діагностування існуючих дефектів гідроагрегату*

Структуру ШНМ (на прикладі Дністровської ГАЕС) зображено на рис. 3.4.

Зазначимо, що агрегати гідроакumuлюючих електростанцій є оборотними, тобто можуть працювати в двох режимах – насосному і турбінному. В першому режимі ГАЕС, споживаючи надлишкову енергію від енергосистеми в години мінімуму навантажень, перекачує воду з нижнього водосховища у верхній акумулюючий басейн. В другому режимі ГАЕС працює в години максимального споживання енергії. Використовуючи воду з верхнього басейну, вона видає електроенергію в систему.

Окрім цих режимів можливий також (досить рідко), так званий, режим синхронного компенсатора, коли від оборотного агрегату в систему надходить лише реактивна енергія.

Окремо відзначимо, що струми навантаження в усіх трьох режимах різні. Крім того, в перших двох режимах відрізняються одне від одного рівні води у нижньому водосховищі та верхньому акумулюючому басейні.

В порівнянні зі звичайними гідроагрегатами, складові вібрації мають певні особливості.

Так, оборотний гідроагрегат має два вали, що посилює складову вібрації, пов'язану з неврівноваженістю ротора.

Суттєво відрізняються і складові вібрації електромагнітного походження. Оскільки, вони прямо пропорційні електричному навантаженню агрегату, то в різних режимах роботи електродинамічні складові будуть різними [33]. Найбільше значення вони будуть мати в насосному режимі, коли номінальна потужність агрегату досягатиме 417 МВт. В турбінному режимі агрегат має потужність 330 МВт і, відповідно, електродинамічні складові вібрації будуть меншими. Що ж стосується режиму синхронного компенсатора, то споживання реактивної потужності мережею завчасно оцінити досить важко, тому електродинамічні складові можуть коливатись в широких межах [34, 35].

Гідродинамічні складові також залежать від режиму роботи агрегату. В насосному режимі потік води більш ламінарний ніж в турбінному, тому і гідродинамічні складові вібрації у насосному режимі менші ніж в турбінному. Очевидно, що в режимі синхронного компенсатора гідродинамічні складові вібрації взагалі відсутні [35].

Як видно з рис. 3.4, передбачається побудова тришарової неоднорідної нестандартної ШНМ.

Кількість вхідних нейронів (на рис. 3.4 вони зображені колами) залежить від кількості частотних смуг в АЧЧС кожного з  $N$  вібросигналів. Якщо кількість частотних смуг в АЧЧС дорівнює  $M$ , то кількість вхідних нейронів дорівнює  $N(M+1)+3$ . Вхідні нейрони виконують функцію прийняття числових даних і їх сортування [36].

Розміри числових масивів, які надходять на кожний вхідний нейрон різні. Так, на перший вхідний нейрон кожної з  $N$  груп надходять неприпустимі значення віброзміщення та їх часові фіксації, розмір цього масиву даних важко передбачити – він може коливатися від 0 до декількох тисяч.

На другий вхідний нейрон надходять один вейвлет-коефіцієнт першої смуги частот, на третій –  $k$  вейвлет-коефіцієнтів другої смуги частот ( $k$  – коефіцієнт стискання ДВП), на четвертий –  $k^2$  вейвлет-коефіцієнтів третьої смуги частот, на останній нейрон кожної групи надходить  $k^{M-1}$  вейвлет-коефіцієнтів  $M$ -ї смуги частот.

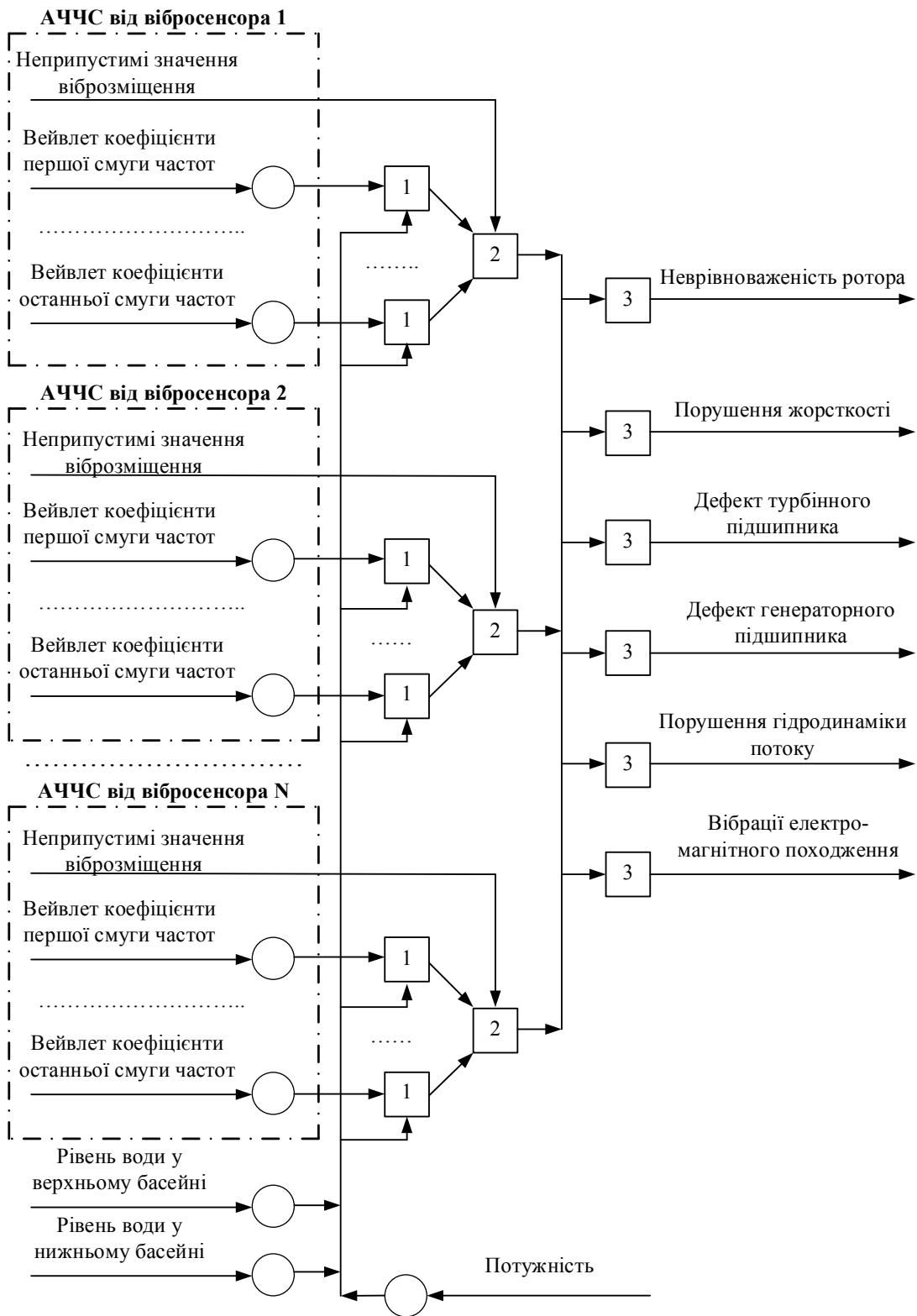


Рисунок 3.4 – Структура ШНМ для діагностування існуючих дефектів гідроагрегату

Кількість значень рівня води у нижньому водосховищі та верхньому акумулюючому басейні з їх часовими фіксаціями теж може коливатись у широких межах, оскільки нове значення рівня повинно находити до вхідного нейрона лише при його зміненні. За аналогічним принципом надходять дані і про потужність навантаження гідрогенератора.

Перший шар ШНМ (позначений цифрою 1) містить  $NM$  нейронів. Кожен з них отримує вейвлет-коефіцієнти певної смуги частот від відповідного вхідного нейрона і одночасно масиви значень напорів води і масив значень потужності навантаження гідрогенератора.

Нейрони першого шару призначені для виділення із АЧЧС кожного з  $N$  вібросигналів спектральних складових, які спричиняються гідродинамічними та електродинамічними чинниками. Крім того, ці нейрони повинні для кожної смуги частот АЧЧС визначити *фонові* спектральні складові.

Ми будемо називати фоновими спектральні складові вібросигналу, коли гідроагрегат, для якого проводиться діагностування, з якихось причин зупинений, а інші агрегати Дністровської ГАЕС працюють. В цьому випадку вібросигнали генеруються гідроагрегатами, що працюють, і через будівельні конструкції передаються на зупинений гідроагрегат, де і фіксуються його вібросенсорами. Зазначимо, що фонові спектральні складові мають визначатися окремо для різних режимів роботи – насосному, турбінному та режимі синхронного компенсатора.

Другий шар ШНМ (позначений цифрою 2) містить  $N$  нейронів. Кожен з них отримує АЧЧС одного з  $N$  віброакустичних сигналів, а також неприпустимі значення віброзміщення та їх часові фіксації для цього вібросигналу. Крім того, до кожного нейрона надходять дані про можливу залежність певних смуг частот відповідної АЧЧС від гідродинамічних та електродинамічних чинників і фонові спектральні характеристики, що є результатом настроювання першого шару ШНМ.

Кожен нейрон другого шару визначає переріз певного АЧЧС для усіх моментів часу, коли віброзміщення цього вібросигналу перевищує припустиме значення.

Третій шар ШНМ (позначений цифрою 3) містить шість нейронів, кожен з яких відповідає одному з чинників, які є причинами виникнення вібрацій.

Кожний нейрон третього шару отримує всі перерізи певного АЧС для моментів часу, коли віброзміщення цього вібросигналу перевищує припустиме значення, а також дані про можливу залежність певних смуг частот відповідної АЧС від гідродинамічних та електродинамічних чинників і фонові спектральні характеристики.

Кожен нейрон третього шару визначає рівень вірогідності того, що причиною надмірного віброзміщення певного вібросигналу є характерний чинник вібрації, якій відповідає цьому нейрону.

Очевидно, що ця ШНМ спрацьовує лише у випадку, коли хоча б в одному з вібросигналів міститься надмірне віброзміщення.

Слід відзначити, що можливі ситуації, коли одночасно декілька різних характерних чинників вібрації отримують високі рівні вірогідності. В цьому випадку ШНМ видасть діагноз про необхідність перевірки під час чергового або позачергового технічного огляду одразу декількох дефектів гідроагрегату.

### ***Математична модель та алгоритм ШНМ САДП-РДГ для діагностування існуючих дефектів гідроагрегату***

Насамперед, відзначимо, що всі процедури цього розділу виконуються з абсолютними значеннями вейвлет-коефіцієнтів.

Як вже було сказано в попередньому підрозділі нейрони першого шару мають виконувати три функції:

- визначати фонові значення вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот при непрацюючому гідроагрегаті, для якого проводиться діагностування в кожному з режимів роботи (насосному, турбінному та режимі синхронного компенсатора);
- визначати залежність вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот від потужності навантаження гідроагрегату в кожному з режимів роботи (насосному, турбінному та режимі синхронного компенсатора);
- визначати залежність вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот від різниці між рівнями води у верхньому акумулюючому басейні та нижньому водосховищі (для насосного та турбінного режимів).

Відомо, що рівень турбулентності обернено пропорційний рівню води у водосховищі, тобто ця залежність має гіперболічний характер [37].

Що ж стосується залежності рівня вібрації від потужності навантаження, то вона має прямо пропорційний характер і в першому наближенні можна вважати її лінійною.

Звичайно, в процесі дослідної експлуатації САДП-РДГ характер цих залежностей може уточнюватися, але, апріорі, для задачі діагностування можна записати:

для насосного та турбінного режиму [38]

$$|d_j| = D_{0xyj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j (H_1 - H_2)^2}, \quad (3.1)$$

для режиму синхронного компенсатора [38]

$$|d_j| = D_{0xej} + d_j^* + v_j Q, \quad (3.2)$$

де  $|d_j|$  – модуль вейвлет-коефіцієнта  $j$ -ї смуги частот в певний момент часу;  $d_j^*$  – значення вейвлет-коефіцієнта  $j$ -ї смуги частот в певний момент часу, яке викликано власними механічними дефектами гідроагрегату;  $H_1$  – рівень води у верхньому акумулюючому басейні;  $H_2$  – рівень води у нижньому водосховищі;  $P$  – активна потужність навантаження гідрогенератора (для насосного або турбінного режиму);  $Q$  – реактивна потужність навантаження гідрогенератора (для режиму синхронного компенсатора);  $D_{0xyj}$  – фонове значення вейвлет-коефіцієнта  $j$ -ї смуги частот в певний момент часу ( $x$  – номер непрацюючого гідроагрегату,  $y$  – номер працюючого гідроагрегату);  $v_j$  – узагальнений числовий коефіцієнт, що характеризує залежність вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот від потужності навантаження;  $p_j, q_j$  – узагальнені числові коефіцієнти, що характеризують залежність вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот від різниці між рівнями води у верхньому акумулюючому басейні та нижньому водосховищі.

Відзначимо, що для умов Дністровської ГАЕС фонове значення вейвлет-коефіцієнта  $D_{0xyj}$  для зупиненого (наприклад, 3-го) гідроагрегату в різні моменти часу може приймати різні значення, оскільки в певний момент часу можуть працювати або 1-й агрегат, або 2-й, або 1-й та 2-й одночасно. Тому слід визначити вектор фонових значень як



$$D_{03xy} = \{D_{031j}, D_{032j}, D_{0312j}\}. \quad (3.3)$$

Коефіцієнти  $p_j, q_j$  визначаються лише для тих смуг частот, для яких вейвлет-коефіцієнти зростають при падінні різниці між рівнями води у верхньому акумулюючому басейні та нижньому водосховищі (інакше  $p_j, q_j$  обнулюються). Аналогічно коефіцієнт  $v_j$  визначається лише для тих смуг частот, для яких вейвлет-коефіцієнти зростають при зростанні потужності навантаження (інакше  $v_j$  обнулюються). Для тих смуг частот, вейвлет-коефіцієнти яких ніяк не реагують ні на рівні води, ні на потужність, з АЧЧС виділяється лише  $D_{0xy}$ .

Отже, кожен нейрон першого шару передає далі в ШНМ, окрім масиву вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот, ще й параметри  $H_1, H_2, P$  (або  $Q$ ),  $D_{0xy}, v_j, p_j, q_j$ .

Процедура, яку виконує кожен нейрон другого шару полягає в тому, що для кожного моменту часу  $\tau$ , для якого віброзміщення перевищує припустиме значення, визначається переріз АЧЧС відповідного вібросигналу. Для цього спочатку в кожній смузі частот  $j$  знаходять інтервали часу  $[t_{j,n} - t_{j,n+1}]$ , які відповідають умові

$$t_{j,n} < \tau < t_{j,n+1}. \quad (3.4)$$

Після цього для всіх  $j = 1, M$  знаходять переріз  $S_\tau(M)$ , який і передається далі в ШНМ.

Таким чином, на кожен нейрон третього шару надходять вектори  $S_\tau(M)$  кожного вібросигналу і параметри  $H_1, H_2, P$  (або  $Q$ ),  $D_{0xy}, v_j, p_j, q_j$  кожної смуги АЧЧС кожного вібросигналу.

Нагадаємо, що кожний нейрон третього шару відповідає за діагностування певного чинника виникнення вібрації. При формуванні нейроподібної мережі в кожен з перших чотирьох нейронів третього шару (які викликаються механічними чинниками) введено апіорну інформацію про перелік номерів смуг частот, на які може впливати чинник цього нейрона. Під час дослідної експлуатації системи цю інформацію регулярно уточнюють.

Для 5-го нейрона цей перелік відповідає номерам смуг частот з ненульовими  $p_j$ ,  $q_j$ , а для 6-го нейрона цей перелік відповідає номерам смуг частот з ненульовими  $v_j$ .

Для зручності, додатково введемо у наведені вище параметри індекс  $i = 1 \dots N$ , який відповідає кожному з  $N$  вібросигналів, та індекс  $k = 1 \dots 6$ , який відповідає кожному з нейронів третього шару ШНМ.

Тоді кожен вектор  $S_{i\tau}(M)$  містить  $M$  елементів  $d_{ij\tau} \in S_{i\tau}(M)$ .

Далі кожен нейрон має виконати такі процедури [39]:

1. Для кожної смуги частот кожного АЧЧС відокремити фонову, гідродинамічну та електродинамічну складові від складових, які викликані іншими чинниками.

Для перших чотирьох нейронів, які характеризують безпосередньо механічні дефекти гідроагрегату, це виконується так:

для насосного та турбінного режиму

$$\forall k = 1, 4 \forall i = 1, N \forall j = 1, M$$

$$\left( d_{kij\tau}^* = |d_{ij\tau}| - D_{0xyj} - v_j P - \frac{1}{p_{ij} + q_{ij}(H_1 - H_2)^2} \right); \quad (3.5)$$

для режиму синхронного компенсатора

$$\forall k = 1, 4 \forall i = 1, N \forall j = 1, M \left( d_{kij\tau}^* = |d_{ij\tau}| - D_{0xyj} - v_j Q \right). \quad (3.6)$$

При цьому, якщо  $d_{kij\tau}^* < 0$ , то це значення обнулюється.

Для п'ятого нейрона, який повинен діагностувати порушення гідродинаміки потоку (лише для насосного та турбінного режиму) можна записати

$$\forall i = 1, N \forall j = 1, M \left( p_j \neq 0 \wedge q_j \neq 0 \Rightarrow d_{5ij\tau}^* = \frac{1}{p_{ij} + q_{ij}(H_1 - H_2)^2} \right). \quad (3.7)$$

Для шостого нейрона, який повинен діагностувати електродинамічну складову вібрації, можна записати:

для насосного та турбінного режиму

$$\forall i = 1, N \forall j = 1, M \left( v_j \neq 0 \Rightarrow d_{6ij\tau}^* = v_j P \right); \quad (3.8)$$

для режиму синхронного компенсатора

$$\forall i = 1, N \forall j = 1, M \left( v_j \neq 0 \Rightarrow d_{6ij\tau}^* = v_j Q \right). \quad (3.9)$$

2. Наступним кроком є нормування всіх елементів  $d_{kij\tau}^*$ , яке виконується з формулою

$$\forall k = 1, 6 \forall i = 1, N \forall j = 1, M \left( d_{kij\tau}^{norm} = \frac{|d_{kij\tau}^*|}{\sum_{k=1}^6 \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^M d_{kij\tau}^*} \right). \quad (3.10)$$

3. Для визначення абсолютного показника вірогідності того, що причиною надмірного віброзміщення є характерний чинник вібрації, якій відповідає  $k$ -му нейрону, використовують його множину номерів смуг частот  $\Psi_k$ . Для  $k = 1 \dots 4$  ця множина задається апріорі з подальшим уточненням, для п'ятого та шостого нейронів за виразами

$$p_j \neq 0 \wedge q_j \neq 0 \Rightarrow j \in \Psi_5; \quad (3.11)$$

$$v_j \neq 0 \Rightarrow j \in \Psi_6. \quad (3.12)$$

Тоді показник вірогідності  $PV_{k\tau}$  чинника, який відповідає  $k$ -му нейрону, на момент часу  $\tau$  визначається як

$$\forall k = 1, 6 \forall i = 1, N \forall j \in \Psi_k \left( PV_{k\tau} = \sum_{i,j} w_{kij} d_{kij\tau}^{norm} \right), \quad (3.13)$$

де  $w_{kij}$  – вагові коефіцієнти, які визначають важливість урахування вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот АЧЧС  $i$ -го вібросигналу при визначенні рівня вірогідності  $k$ -го нейрона.

Апріорі, вагові коефіцієнти визначаються так:

- для першого, другого, п'ятого та шостого нейронів вони беруться однаковими і дорівнюють 1;

- для третього нейрона (дефекти турбінного підшипника) пріоритетним доцільно вважати АЧЧС вібросигналів, отриманих від вібросенсорів, встановлених на турбінному підшипнику, тому для них  $w_{kij} = 1$ , а для АЧЧС вібросигналів, отриманих від вібросенсорів, встановлених на генераторному підшипнику, доцільно ввести знижені вагові коефіцієнти, наприклад,  $w_{kij} = 0,5$ ;

- аналогічно для четвертого нейрона (дефекти генераторного підшипника) пріоритетним доцільно вважати АЧЧС вібросигналів, отриманих від вібросенсорів, встановлених на генераторному підшипнику, тому для них  $w_{kij} = 1$ , а для АЧЧС вібросигналів, отриманих від вібросенсорів, встановлених на турбінному підшипнику, доцільно ввести знижені вагові коефіцієнти, наприклад,  $w_{kij} = 0,5$ .

Уточнення вагових коефіцієнтів має здійснюватись в процесі дослідної експлуатації системи, для чого пропонується кореляційний підхід, математична модель якого буде наведена далі.

4. В процесі експлуатації САДП-РДГ випадки перевищення припустимих віброзміщень будуть час від часу повторюватися, тому передбачено накопичення та усереднення отриманих показників вірогідності кожного нейрона, тобто за певний проміжок часу  $t$

$$PV_{kt} = \frac{\sum PV_{k\tau}}{N_t}, \quad (3.14)$$

де  $N_t$  – кількість випадків перевищення припустимого віброзміщення за час  $t$ .

5. Таким чином можна сформуванати множину показників вірогідності всіх нейронів третього шару ШНМ  $\{PV_{1t}, PV_{2t}, PV_{3t}, PV_{4t}, PV_{5t}, PV_{6t}\}$ .

Аналізуючи наведені вище вирази, неважко помітити, що значення показників вірогідності будуть досить малими і це викличе певні незручності при їх аналізі. Тому доцільно ввести відносний *рівень вірогідності*  $RV_{kt}$  за формулою

$$RV_{kt} = \frac{PV_{kt}}{\max(PV_{1t}, PV_{2t}, PV_{3t}, PV_{4t}, PV_{5t}, PV_{6t})}. \quad (3.15)$$

6. Нарешті, ми можемо перейти до формулювання діагностичного висновку. При цьому слід пам'ятати, що причиною вібрації є одночасна дія всіх без винятку чинників, тому мова може йти лише про встановлення деякої ієрархії небезпеки цих чинників для гідроагрегату в поточний момент часу.

Отже, результуючий діагностичний висновок може бути сформульований як множина значень рівнів вірогідності різних чинників вібрації  $\{RV_{1t}, RV_{2t}, RV_{3t}, RV_{4t}, RV_{5t}, RV_{6t}\}$ .

На рис. 3.5 зображено блок-схему алгоритму, який відповідає наведеній вище математичній моделі.



Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму ШНМ для діагностування існуючих дефектів гідроагрегату

Зупинимося окремо на проблемі настроювання ШНМ.

Кожен гідроагрегат є виключно складною електрогідромеханічною системою і його вібраційні характеристики містять багато індивідуальних особливостей. Це означає, що під час дослідної експлуатації необхідно регулярно уточнювати такі параметри:

- множину номерів смуг частот  $\Psi_k$ , на які може впливати чинник  $k$ -го нейрона;
- вектор фонових значень  $D_{0xyj}$ ;
- $v_j$  – узагальнений числовий коефіцієнт, що характеризує залежність вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот від потужності навантаження;
- $p_j, q_j$  – узагальнені числові коефіцієнти, що характеризують залежність вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот від різниці між рівнями води у верхньому акумулюючому басейні та нижньому водосховищі;
- $w_{kij}$  – вагові коефіцієнти, які визначають важливість урахування вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот АЧЧС  $i$ -го вібросигналу на рівні вірогідності  $k$ -го нейрона.

Множина номерів смуг частот  $\Psi_k$  уточнюється під час кожного чергового або позачергового технічного огляду гідроагрегату відповідальними особами обслуговуючого персоналу ГЕС, які порівнюють архівні дані рівнів вірогідності різних чинників вібрації з рівнем зношеності основних вузлів гідроагрегату.

Алгоритми уточнення параметрів  $D_{0xyj}$ ,  $v_j$ ,  $p_j$ ,  $q_j$  та  $w_{kij}$  розглянемо далі.

### **3.3 Математичні моделі та алгоритми експериментального визначення фонових, електродинамічних та гідродинамічних складових АЧЧС вібросигналу і вагових коефіцієнтів**

Нагадаємо, що перед тим, як формувати діагностичні та прогнозні висновки, необхідно відокремити складові АЧЧС вібросигналу, які залежать від внутрішніх чинників (тобто від механічних дефектів гідроагрегату), від складових АЧЧС, що залежать від зовнішніх чинників (тобто від навантаження, напору води та вібрації інших агрегатів).

Зазначимо, що параметри  $D_{0xyj}$ ,  $v_j$ ,  $p_j$ ,  $q_j$  та  $w_{kij}$  визначаються для насосного та турбінного режимів окремо.

Для режиму синхронного компенсатора визначаються лише параметри  $D_{0xyj}$ ,  $v_j$  та  $w_{kij}$ , оскільки в цьому режимі гідрогенератор виробляє реактивну енергію і перетоки води відсутні.

### **Визначення фонових, електро- та гідродинамічних складових АЧЧС вібросигналів**

Визначимо, наприклад, фонові значення складових АЧЧС (для кожної смуги частот) для зупиненого 3-го гідроагрегату. Для цього необхідно сформувавши вектор  $D_{03yj} = \{D_{031j}, D_{032j}, D_{0312j}\}$ , де  $D_{031j}$  – фонове значення, якщо працює лише 1-й гідроагрегат,  $D_{032j}$  – фонове значення, якщо працює лише 2-й гідроагрегат,  $D_{0312j}$  – фонове значення, якщо працюють 1-й та 2-й гідроагрегати одночасно.

Аналогічно, для 1-го гідроагрегату треба сформувавши вектор  $D_{01yj} = \{D_{012j}, D_{013j}, D_{0123j}\}$ , а для 2-го гідроагрегату – вектор  $D_{02xj} = \{D_{021j}, D_{023j}, D_{0213j}\}$ .

Кожен з цих параметрів (наприклад,  $D_{021j}$ ) визначають як середнє значення модулів вейвлет-коефіцієнтів за період роботи лише у-го гідроагрегату, тобто [40, 41]

$$D_{021j} = \frac{\sum |d_j|}{N}, \quad (3.16)$$

де  $\sum |d_j|$  – сума модулів вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот за період роботи лише 1-го гідроагрегату (включаючи ті, що повторюються);  $N$  – кількість модулів вейвлет-коефіцієнтів  $j$ -ї смуги частот за період роботи лише 1-го гідроагрегату.

Для подальшого відокремлення електродинамічної складової АЧЧС для кожної смуги частот необхідно визначити коефіцієнт  $v_j$ .

В насосному або турбінному режимах виберемо два послідовних моменти часу  $t_1$  та  $t_2$  з однаковими значеннями напору  $(H_1 - H_2)$  та різними  $P_1$  та  $P_2$ . Вважаючи, що фонові складові і складові, які викликані механічними дефектами, швидко не змінюються [42, 43], запишемо

$$|d_{j1}| = D_{0xyj} + d_j^* + v_j P_1 + \frac{1}{p_j + q_j (H_1 - H_2)^2}; \quad (3.17)$$

$$|d_{j2}| = D_{0xyj} + d_j^* + v_j P_2 + \frac{1}{p_j + q_j (H_1 - H_2)^2}. \quad (3.18)$$

Тоді, якщо відняти від першого рівняння друге, одержимо

$$|d_{j1}| - |d_{j2}| = v_j P_1 - v_j P_2.$$

Звідки

$$v_j = \frac{|d_{j1}| - |d_{j2}|}{P_1 - P_2}. \quad (3.19)$$

Якщо  $v_j < 0$ , цей параметр обнулюється.

Очевидно в режимі синхронного компенсатора остання формула матиме вигляд

$$v_j = \frac{|d_{j1}| - |d_{j2}|}{Q_1 - Q_2}. \quad (3.20)$$

Цю процедуру слід протягом дослідної експлуатації час від часу повторювати і значення  $v_j$  усереднювати.

Аналогічно визначаються і коефіцієнти  $p_j, q_j$ , але оскільки їх два, то ми повинні скласти систему рівнянь.

Для цього виберемо чотири послідовних моменти часу  $t_1, t_2, t_3, t_4$  з однаковими значеннями  $P$  та різними значеннями напорів ( $h_1, h_2, h_3, h_4$ ), які визначаються так:  $h = H_1 - H_2$ . Вважаючи, що фонові складові і складові, які викликані механічними дефектами, швидко не змінюються

$$|d_{j1}| = D_{0xyj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j h_1^2}; \quad (3.21)$$

$$|d_{j2}| = D_{0xyj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j h_2^2}; \quad (3.22)$$

$$|d_{j3}| = D_{0xyj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j h_3^2}; \quad (3.23)$$

$$|d_{j4}| = D_{0xyj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j h_4^2}. \quad (3.24)$$

Віднявши від першого рівняння друге, а від третього четверте, отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} |d_{j1}| - |d_{j2}| = \frac{1}{p_j + q_j h_1^2} - \frac{1}{p_j + q_j h_2^2}; \\ |d_{j3}| - |d_{j4}| = \frac{1}{p_j + q_j h_3^2} - \frac{1}{p_j + q_j h_4^2}. \end{cases} \quad (3.25)$$



Усунувши змінні із знаменника, одержимо

$$\begin{cases} p_j^2 + p_j q_j (h_1^2 + h_2^2) + q_j^2 h_1^2 h_2^2 - q_j \frac{h_2^2 - h_1^2}{|d_{j1}| - |d_{j2}|} = 0; \\ p_j^2 + p_j q_j (h_3^2 + h_4^2) + q_j^2 h_3^2 h_4^2 - q_j \frac{h_4^2 - h_3^2}{|d_{j3}| - |d_{j4}|} = 0. \end{cases} \quad (3.26)$$

Розв'язання цієї системи виконується одним з ітераційних методів. При цьому, якщо  $p_j < 0 \wedge q_j < 0$ , ці параметри обнулюються.

Цю процедуру слід протягом дослідної експлуатації час від часу повторювати а значення  $p_j$ ,  $q_j$  усереднювати [44].

На основі наведеного вище побудовано алгоритм, блок-схему якого зображено на рис. 3.6.

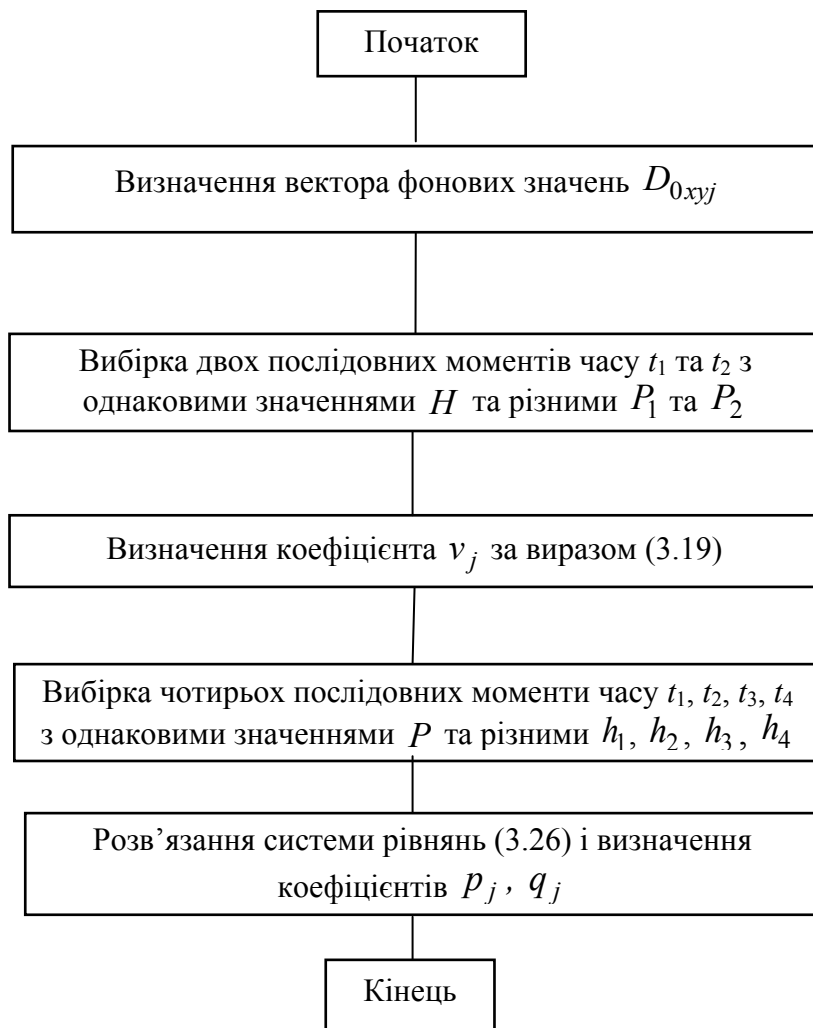


Рисунок 3.6 – Блок-схема алгоритму визначення складових АЧЧС

### **Визначення вагових коефіцієнтів ШНМ**

Гідроагрегат можна представити як відносно стаціонарну розподілену квазілінеаризовану нерозривну пружну систему зі змінними у просторі коефіцієнтами жорсткості [45]. Ще однією особливістю об'єкта контролю (ОК) буде дія на нього  $k$  просторово рознесених некомпенсованих механічних сил різної природи, амплітуди та векторного напрямку, що змінюватимуться у функції часу довільним чином. Узагальнену структуру такого ОК можна подати у наступному вигляді (рис. 3.7).

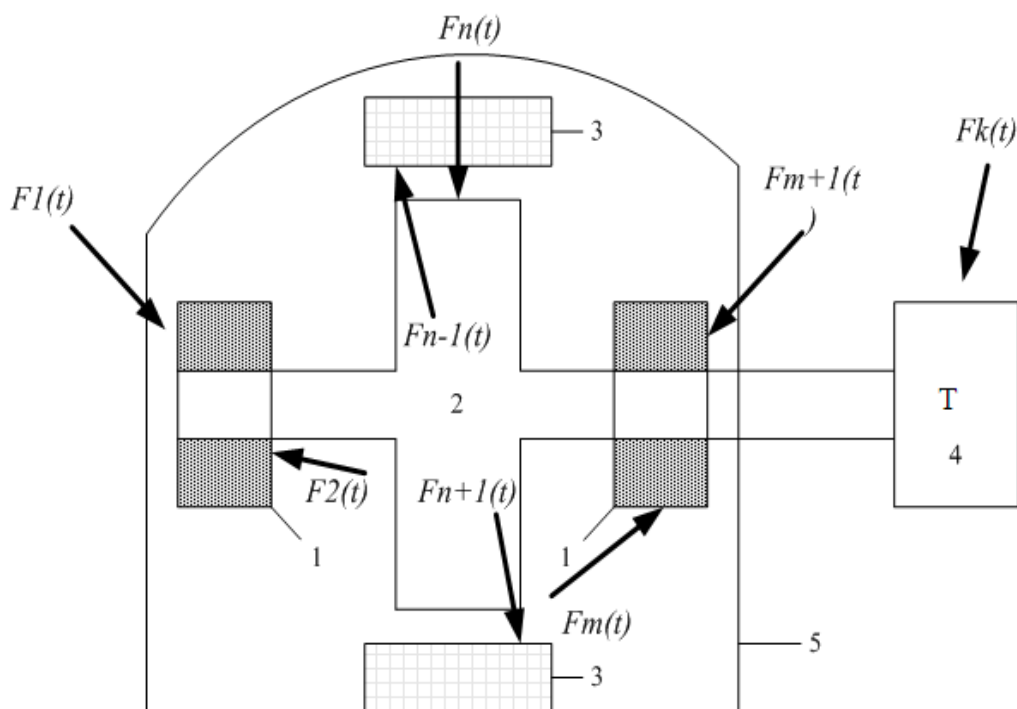


Рисунок 3.7 – Узагальнена структурна схема обертової електричної машини (1 – підшипники; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – турбіна; 5 – зовнішній кожух)

Враховуючи нерозривність такої системи, будь-яка із  $k$  зовнішніх некомпенсованих збурюючих сил викликатиме у довільно обраній точці (вузлі) системи появу  $k$ -ї складової вібросигналу (реакції), амплітуда якого буде відмінною від нуля [46]. При цьому, враховуючи квазілінійність системи, векторно тотожна сила, рівнодійна якій прикладена до однієї і тієї ж точки електричної машини з затримкою в часі  $\Delta t$  викликатиме появу тотожної реакції системи з тією ж затримкою у часі у будь-якому довільно обраному вузлі агрегату. Таким чином, для

довільно обраного контрольованого вузла відносно кожної з  $k$  можливих збурюючих сил може бути отримано функцію зв'язку. Для довільно обраного вузла А, що є частиною ОК буде справедливою така система рівнянь:

$$\begin{cases} \psi_{A1}(t) = F_1(t) \cdot H_{A1}(t); \\ \psi_{A2}(t) = F_2(t) \cdot H_{A2}(t); \\ \dots\dots\dots; \\ \psi_{Ak}(t) = F_k(t) \cdot H_{Ak}(t), \end{cases} \quad (3.27)$$

де  $F_1(t)–F_k(t)$  – некомпенсовані сили, що діють на електричну машину;  $H_{A1}(t)–H_{Ak}(t)$  – перехідні характеристики відносно збурюючих сил  $F_1(t)–F_k(t)$ , відповідно;  $\psi_{A1}(t)–\psi_{Ak}(t)$  – реакція системи у точці А на дію збурення у вигляді сил  $F_1(t)–F_k(t)$ , відповідно.

У такому випадку результуючий віброцигнал, що спостерігатиметься у точці А, може бути знайдений, виходячи із принципу суперпозиції.

$$\psi_A(t) = \sum_{i=1}^k \psi_{Ai}(t) = \sum_{i=1}^k F_i(t) \cdot H_{Ai}(t). \quad (3.28)$$

Виходячи з аналогічних міркувань, описаний математичний апарат можливо поширити на будь-яку іншу довільну точку В, що також належить ОК та не збігається з точкою А. У такому випадку, для точки В залежність реакції віброцигналу від збурюючих сил запишеться у такому вигляді:

$$\begin{cases} \psi_{B1}(t) = F_1(t) \cdot H_{B1}(t); \\ \psi_{B2}(t) = F_2(t) \cdot H_{B2}(t); \\ \dots\dots\dots; \\ \psi_{Bk}(t) = F_k(t) \cdot H_{Bk}(t), \end{cases} \quad (3.29)$$

$$\psi_B(t) = \sum_{i=1}^k \psi_{Bi}(t) = \sum_{i=1}^k F_i(t) \cdot H_{Bi}(t). \quad (3.30)$$

Враховуючи наведені формули, а також те, що ОК є квазілінійною системою, залежність кожної реакції системи у точці В від реакції системи у точці А матиме вигляд:

$$\psi_{Bi}(t) = \frac{H_{Bi}(t)}{H_{Ai}(t)} \psi_{Ai}(t). \quad (3.31)$$

Звідси, загальна реакція системи у точці В визначається як

$$\psi_B(t) = \sum_{i=1}^k \frac{H_{Bi}(t)}{H_{Ai}(t)} \psi_{Ai}(t). \quad (3.32)$$

Аналогічним чином можуть бути пов'язаними між собою й інші точки, що належать ОК.

Хоча вираз (3.32) теоретично дає змогу встановити однозначний зв'язок між функціями вібросигналу у різних частинах ОК, що могло б забезпечити можливість на основі відомих реалізацій вібросигналу у зазначених точках відновити вклад кожної із сил  $F_i(t)$  для кожного досліджуваного моменту часу, проте для реальної обертової електричної машини на практиці не можливо визначити не лише конкретні точки прикладання рівнодійних збуджуючих сил, а й навіть отримати достовірну інформацію про їх точну кількість [7, 47, 48]. Тож, застосування (3.32) у чистому вигляді є доволі обмеженим. Про те, для встановлення типу збуджуючої дії під час експлуатації реальної обертової електричної машини у низці випадків буде цілком достатнім наближено визначити локальну область прикладання домінуючого збудрення, що значно полегшує вирішення поставленої задачі.

Враховуючи сказане і також те, що у зв'язку з стохастичним характером збуджуючих некомпенсованих сил  $F_1(t) - F_k(t)$ , розглянутий ОК можна вважати стохастичною системою, а вираз (3.31), по суті, перетвориться у теоретичне обґрунтування наявності взаємкореляційних зв'язків між реакціями вібросигналу у різних точках досліджуваної електричної машини. При чому, враховуючи те, що коефіцієнт жорсткості конструкцій ОК в околі будь-якої його точки буде більшим від нуля [49], є очевидним, що значення коефіцієнта взаємної кореляції між вібросигналами у досліджуваних вузлах буде зростати при наближенні точки прикладання значущої складової зовнішнього збудрення до умовної точки механічного центра між ними, а також буде пропорційним відносному вкладу цієї збуджуючої сили у формуванні загального вібросигналу. Також є очевидним і те твердження, що амплітуда вібросигналу окремо узятото вузла буде пропорційною як умовній механічній відстані до точок прикладання значущих збуджуючих сил, так і їх абсолютній амплітуді. Отже, цілком адекватною можна вважати гіпотезу про те, що використання коефіцієнтів взаємкореля-

ції вібросигналів між рознесеними у просторі вузлами ОК разом із їх миттєвими амплітудами дозволить отримати масив даних, що міститиме у собі інформацію не лише про амплітуду збурюючих впливів, а й їх просторову локалізацію, що може бути з доволі високою імовірністю пов'язана з причинами їх виникнення.

Суттєвою проблемою при використанні запропонованого підходу є отримання миттєвих значень коефіцієнтів взаємкореляції. Оскільки, як було показано вище, вібраційні процеси у контрольованих вузлах електричної машини мають випадковий характер, то для точної оцінки лінійного зв'язку між двома величинами  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$  мав би застосовуватися такий вираз [46]

$$K_\psi(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\psi_1 - m_A(t_1))(\psi_2 - m_B(t_2)) \times \\ \times f(\psi_1, \psi_2, t_1, t_2) d\psi_1 d\psi_2, \quad (3.33)$$

де  $m_A(t_1)$ ,  $m_B(t_2)$  – математичні очікування функцій  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$  у моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ , відповідно;  $f(\psi_1, \psi_2, t_1, t_2)$  – двовимірна густина ймовірності випадкового процесу  $\psi(t)$ , що обумовлює появу вібросигналів у вузлах А та В, яка визначається у моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ , відносно яких випадковий процес  $\psi(t)$  можна розглядати як систему двох випадкових величин  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$ , значеннями  $\psi_1$  та  $\psi_2$  яких є значення  $\psi_A(t_1)$  та  $\psi_B(t_2)$  реалізацій випадкового процесу, зафіксовані в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ .

$$f(\psi_1, \psi_2, t_1, t_2) = \frac{\partial^2 F(\psi_1, \psi_2, t_1, t_2)}{\partial \psi_1 \partial \psi_2}, \quad (3.34)$$

де  $F(\psi_1, \psi_2, t_1, t_2)$  – двовимірна функція розподілу ймовірностей випадкового процесу  $\psi(t)$ , яка задає значення ймовірності того, що у момент часу  $t_1$  виконується нерівність  $\psi_A \leq \psi_1$ , а у момент часу  $t_2$  виконується нерівність  $\psi_B \leq \psi_2$ , тобто

$$F(\psi_1, \psi_2, t_1, t_2) = P(\psi_A(t_1) \leq \psi_1, \psi_B(t_2) \leq \psi_2). \quad (3.35)$$

Адаптуємо наведений вище математичний апарат до досліджуваного ОК. Як було показано раніше, збурюючі сили  $F_1(t)–F_k(t)$  розподіляються по ОК таким чином, що точки прикладання їх рівнодійних можуть знаходитися на різних умовних механічних відстанях від вузлів А та В. При чому, для деяких із сил умовна механічна відстань від точки прикладання рівнодійної до вузла А буде більшою за умовну механічну відстань до вузла В, для деяких – рівною, а для деяких – меншою. Тож, швидкість поширення механічного збурення для кожної із  $k$  сил до контрольованих вузлів буде різною, що не дає змогу говорити про наявність часової затримки між реакціями системи у зазначених точках. А отже, враховуючи особливість ОК, коефіцієнт автокореляції між сигналами  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$  доцільно визначати для одного і того ж самого моменту часу, тобто  $t_1 = t_2$ .

Наслідком цього є те, що коефіцієнт взаємокореляції  $K_\psi(t_1, t_2)$  перетвориться у  $K_\psi(t_1)$ .

Розглядаючи вібросигнал при стаціонарних збурюючих зовнішніх впливах  $F_1(t)–F_k(t)$ , що фізично відповідатиме постійному якісному складу та стаціонарності законів зміни амплітуд некомпенсованих сил  $F_1(t)–F_k(t)$ , сигнали  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$  можна вважати ергодичними. У такому випадку коефіцієнт взаємокореляції  $K_\psi(t_1)$  стаціонарного випадкового процесу  $\psi(t)$  із прийнятною похибкою можна вважати рівним коефіцієнту взаємокореляції деякої часової реалізації сигналів  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$ , для яких буде виконуватися властивість ергодичності. Враховуючи той факт, що збурюючі сили  $F_1(t)–F_k(t)$  стаціонарними можна вважати лише протягом достатньо невеликого проміжку часу, а значення вібросигналу перебуває у функціональній залежності від кутового положення ротора електричної машини [48, 50], найбільш прийнятною у такому випадку буде тривалість реалізації часових рядів функцій  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$ , що буде збігатися з тривалістю періоду обертання ротора електричної машини (для швидкохідних машин може бути кратною періоду при прийнятному значенні тривалості). В результаті чого цілком доцільним та обґрунтованим буде перехід від розрахунку миттєвих коефіцієнтів взаємокореляції до розрахунку квазі-

миттєвих коефіцієнтів, що прив'язані до зазначеної тривалості часової реалізації функцій  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$ . Виходячи з цього, шуканий квазі-миттєвий коефіцієнт взаємкореляції може бути розрахований таким чином:

$$K_{\psi}^*(t_1) = \frac{1}{T} \int_0^T (\psi_A^*(t_1) - m_A(t_1)) (\psi_B^*(t_1) - m_B(t_1)) dt_1, \quad (3.36)$$

де  $T$  – тривалість часових реалізацій функцій  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$ ;  $\psi_A^*(t)$  та  $\psi_B^*(t)$  – часові реалізації цих же функцій.

Оскільки коливання будь-якого пружного тіла відбувається відносно деякого центрального (нульового) положення, то на проміжку часу, що є кратним періоду обертання ротора електричної машини, вібросигнал будь-якого її вузла можна вважати центрованим. У такому випадку вираз для розрахунку коефіцієнта взаємкореляції між вібросигналами двох розосереджених вузлів запишеться таким чином [51]:

$$K_{\psi}^*(t_1) = \frac{1}{T} \int_0^T (\psi_A^*(t_1)) (\psi_B^*(t_1)) dt_1. \quad (3.37)$$

Зазвичай, вимірювання вихідних вібросигналів у реальних системах контролю часто здійснюється дискретно, тому для дискретних часових реалізацій, з урахуванням відомого рівняння Пірсона, можна записати

$$K_{\psi}^*(t_1) = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_{Ai}^* \psi_{Bi}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \psi_{Ai}^{*2} \cdot \sum_{i=1}^n \psi_{Bi}^{*2}}}, \quad (3.38)$$

де  $\psi_{Ai}^*$  та  $\psi_{Bi}^*$  –  $i$ -ті значення часових реалізацій функцій  $\psi_A(t)$  та  $\psi_B(t)$ .

На основі вищенаведеної математичної моделі сформовано алгоритм блок-схема якого зображена на рис. 3.8.

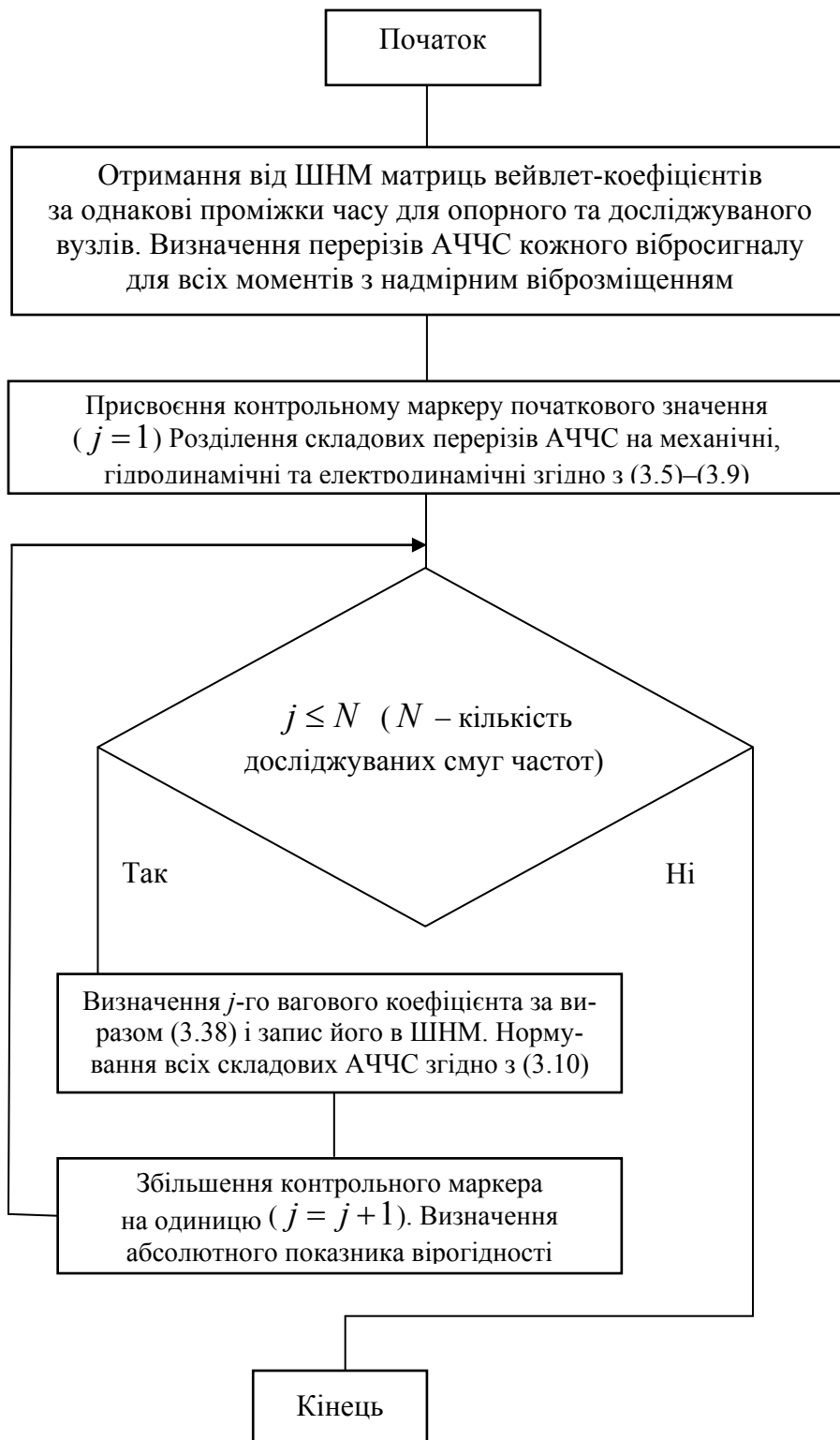


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритму визначення вагових коефіцієнтів

Всі наведені вище алгоритми були програмно реалізовані.

В наступному підрозділі розглядаються приклади діагностичних висновків, отримані для гідрогенераторів Нижньодністровської ГЕС.



### 3.4 Попередні діагностичні висновки щодо існуючих дефектів гідроагрегатів Нижньодністрівської ГЕС

Спочатку розглянемо визначення фонових, електро- та гідродинамічних складових АЧЧС вібросигналів, а також вагових коефіцієнтів.

#### *Фонові, електро- та гідродинамічні складові АЧЧС вібросигналів*

В табл. 3.1 наведені дати та час запису архівних файлів вібросигналів, отриманих від вібросенсорів 3-го гідроагрегату Нижньодністрівської ГЕС, які були використані для визначення складових АЧЧС вібросигналів. Також в цій таблиці містяться напір води і потужність генератора.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для визначення складових АЧЧС вібросигналів

Процедура		Напір, м	Потужність, МВт	Дата та час запису архівного файла вібросигналу
Визначення фонових складових	Від 1-го агрегату	–	–	6.01.2012 від 1–00 до 18–00
	Від 2-го агрегату	–	–	5.01.2012 від 1–00 до 18–00
	Від обох агрегатів	–	–	28.01.2012 від 19–00 до 20–00
Визначення $v$		6,15	5,4	6.03.2012 9–00
		6,15	4	18.05.2012 15–00
Визначення $p, q$		6,5	4,8	21.05.2012 17–00
		6,4	4,8	1.02.2012 19–00
		5,55	4,8	6.03.2012 19–00
		5,5	4,8	14.05.2012 17–00

Результатами роботи підпрограми, реалізованої за алгоритмом, зображеним на рис. 3.6, є вектори шуканих параметрів, тобто їх значення для кожної з 14-ти смуг частот. Ці вектори зведені в табл. 3.2.

Ці результати є попередніми і мають постійно уточнюватися протягом дослідної експлуатації САДП-РДГ.

Таблиця 3.2 – Складові АЧЧС вібросигналів

Параметри		Вектор значень параметра
Фонові складові	Від 1-го агрегату	{0,03127; 0,04176; 0,03615; 0,02507; 0,06449; 0,07881; 0,08289; 0,17227; 0,30571; 0,08542; 0,08653; 0,06838; 0,03826; 0,00754}
	Від 2-го агрегату	{0,15568; 0,23978; 0,38381; 0,45569; 0,51336; 0,51071; 0,49748; 0,49705; 0,55044; 0,35927; 0,15250; 0,04728; 0,02226; 0,00685}
	Від обох агрегатів разом	{0,28008; 0,45449; 0,72585; 0,87523; 0,96223; 0,006157680,94261; 0,91208; 0,82182; 0,79517; 0,63311; 0,21847; 0,02619; 0,00627}
$v$		{0,418; 0,131; 0,496; 0,242; 0; 0,218; 0,56; 0,131; 0; 0; 0,098; 0,0055; 0; 0}
$p$		{0,187; 1,406; 1,104; 2,05; 1,78; 3,24; 0,158; 0,21; 0,927; 0,183; 0,417; 15,9; 7,69; 15,8}
$q$		{0,005; 0,174; 0,171; 0,17; 0,192; 0,189; 0,01; 0,005; 0,18; 0,006; 0,006; 0,181; 0,006; 0,007}

Аналізуючи зміст табл. 3.2 можна зробити висновки:

1. Фонові складові АЧЧС, що викликані 1-м гідроагрегатом суттєво нижчі ніж складові, які викликані 2-м гідроагрегатом.

Це може мати місце внаслідок таких причин:

1.1. Перший гідроагрегат знаходиться на більшій відстані від третього, ніж другий, тому його віброакустичний сигнал швидше згасає.

1.2. Особливості конструкції другого гідроагрегату призводять до більшої вібрації.

1.3. Більшого електричного навантаження чи меншого рівня води у водосховищі на другому гідроагрегаті під час архівних вимірювань.

2. Сумарні фонові складові АЧЧС, що викликані 1-м та 2-м гідроагрегатами одночасно, не є арифметичною сумою складових, викликаних цими гідроагрегатами окремо.

Це, скоріш за все, викликано тим, що фонові складові АЧЧС для окремих гідроагрегатів та для їх одночасної роботи визначалися для різних проміжків часу (див. табл. 3.1), при різних значеннях електричного навантаження та рівня води у водосховищі.

3. Коефіцієнт  $v_j$ , який задає залежність електродинамічної складової АЧЧС від електричного навантаження, має нульові значення на 5-й, 9-й, 10-й, 13-й та 14-й смугах частот.

Тому, ці номери смуг частот можна не включати в апіорну множину смуг частот  $\Psi$ , яка задається для шостого нейрона. Звичайно, ця

множина повинна постійно уточнюватися протягом дослідної експлуатації САДП-РДГ.

4. Коефіцієнти  $p_j, q_j$ , які задають залежність гідродинамічної складової АЧЧС від рівня води у водосховищі, на всіх смугах частот мають ненульові значення.

Тому, на початку дослідної експлуатації САДП-РДГ має сенс включати в апріорну множину смуг частот  $\Psi$ , яка задається для п'ятого нейрона, всі смуги частот, і надалі проводити постійне уточнення цих коефіцієнтів.

### ***Вагові коефіцієнти ШНМ***

Вхідними даними програми визначення вагових коефіцієнтів ШНМ, розробленої згідно з алгоритмом (див. рис. 3.8), є матриці вейвлет-коефіцієнтів АЧЧС.

В цьому прикладі вони були розраховані за допомогою ДВП для архівних значень вібросигналів Нижньодністровської ГЕС за однакові проміжки часу для кожного з вібросенсорів, встановлених на турбінному і опорно-упорному підшипниках по горизонтальній та вертикальній осях. Необхідні стеки архівних даних були вибрані для значень навантаження першого гідрогенератора 6,1 МВт та 3,7 МВт.

Приклад такої матриці наведено на рис. 3.9.

Вагові коефіцієнти (коефіцієнти взаємкореляції) визначалися для частотних смуг з третьої по чотирнадцяту. При цьому для формування часових реалізацій третьої частотної смуги було використано 4 послідовних значення, для четвертої – вісім, для решти – десять. Визначені на основі експериментальних даних коефіцієнти зведені до табл. 3.3, 3.4.

0,02069	-0,01008	0,00755	0,02031	0,02619	0,0103	0,01195	0,01467	-0,00045	0,00688	0,00964	0,01421	0,00
0,01728	-0,00119	-0,00327	0,02602	-0,02754	-0,01236	0,00052	-0,01992	0,00273	0,00361	0,01112	0,00858	-
0,01759	0,04836	-0,04893	0,11513	-0,1395	0,10373	-0,11438	-0,01685	0,14243	-0,20017	0,22514	-0,05899	-
-0,2419	-0,88442	0,06589	-0,08955	0,48909	-0,04607	-0,32788	0,78221	-0,47923	-0,19158	0,00955	0,46991	-
2,35352	-1,72711	1,82403	-4,58843	0,29455	0,87866	4,22881	-2,21588	-1,76549	-1,29282	5,94472	-4,36734	-
1,4979	4,5	2,05287	5,21291	6,14076	0,22188	1,95654	4,13263	-0,83317	0,24727	-1,03711	3,40606	3,30089
2,48321	-0,09981	2,56417	-1,93959	0,24257	3,86009	-0,96053	-0,73273	3,2154	-1,55479	-1,69598	1,57373	1
2,86545	3,79834	0,47512	-0,56832	1,7388	2,28785	5,46944	1,98003	1,29479	-3,25119	-5,9838	1,56397	3,53
-1,3988	2,69136	-3,18709	-1,3624	-0,40712	-0,13094	-3,04697	1,09537	3,42112	-0,46046	1,45545	1,09923	1,
-3,18812	-6,45123	-0,81392	4,88748	2,30427	-2,47239	1,54511	1,17681	3,70308	-0,57574	1,47907	1,09741	1
-3,08478	-6,54706	-0,78777	4,88343	2,30446	-2,47237	1,54511	1,17681					
-3,08466	-6,54704	-0,78777	4,88343									
-3,08466	-6,54704											
-3,08466												

Рисунок 3.9 – Фрагмент прикладу матриці вейвлет-коефіцієнтів АЧЧС для опорно-упорного підшипника (вісь Y, навантаження – 6,1 МВт)

Таблиця 3.3 – Результати визначення вагових коефіцієнтів (навантаження – 6,1 МВт)

Місце отримання та вісь вхідних сигналів	Номер смуги частот											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Опорний підшипник, вісь Y – турбінний підшипник, вісь Y	0,821	0,707	0,73	0,953	0,703	0,879	0,693	0,527	0,64	0,754	0,53	0,699
Опорний підшипник, вісь Y – опорний підшипник, вісь X	0,851	0,83	0,862	0,864	0,846	0,794	0,683	0,699	0,763	0,849	0,64	0,68
Опорний підшипник, вісь X – турбінний підшипник, вісь X	0,642	0,658	0,612	0,688	0,606	0,846	0,753	0,688	0,585	0,816	0,668	0,57
Турбінний підшипник, вісь X – турбінний підшипник, вісь Y	0,625	0,524	0,691	0,877	0,905	0,741	0,831	0,765	0,781	0,641	0,634	0,29

Таблиця 3.4 – Результати визначення вагових коефіцієнтів (навантаження – 3,7 МВт)

Місце отримання та вісь вхідних сигналів	Номер смуги частот											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Опорний підшипник, вісь Y – турбінний підшипник, вісь Y	0,908	0,6939	0,767	0,75	0,565	0,68	0,485	0,46	0,75	0,908	0,526	0,755
Опорний підшипник, вісь Y – опорний підшипник, вісь X	0,611	0,614	0,765	0,744	0,626	0,637	0,791	0,598	0,774	0,646	0,698	0,62
Опорний підшипник, вісь X – турбінний підшипник, вісь X	0,891	0,588	0,517	0,288	0,475	0,68	0,728	0,684	0,63	0,381	0,882	0,389
Турбінний підшипник, вісь X – турбінний підшипник, вісь Y	0,815	0,73	0,636	0,703	0,696	0,511	0,758	0,83	0,678	0,536	0,722	0,177

Проаналізуємо результати досліджень.

Раніше було показано, що кожен рядок матриці вейвлет-коефіцієнтів АЧЧС відповідає певній смузі частот спектру [52, 53].

Верхня межа спектру, згідно з теоремою Котельнікова–Шеннона, дорівнює половині частоти дискретизації вимірювальних каналів вібрації [54, 55]. Оскільки для вимірювальних каналів вібрації Нижньодністровської ГЕС частоти дискретизації складає 913,92 Гц, то верхня межа спектра – 456,96 Гц.

Коефіцієнт стискання дискретного вейвлет-перетворення, що було використано в наведеному дослідженні, дорівнював 2, тому кожна наступна смуга частот удвічі ширша за попередню.

Довжина стеку значень вібросигналу, який надходить від кожного вібросенсора складає 32768 значень, тому за алгоритмом ДВП кількість смуг частот в АЧЧС дорівнює 14.

В [56] був проведений розрахунок смуг частот АЧЧС в середовищі Excel, результати якого показані на рис. 3.10.

	A	B	C	D	E
1	<b>Fd</b>	<b>Смуга частот</b>	<b>Ширина смуги</b>	<b>Початок смуги</b>	<b>Кінець смуги</b>
2	<i>913,92</i>	<i>1</i>	<i>0,027892327</i>	<i>0</i>	<i>0,027892327</i>
3	<b>dF</b>	<i>2</i>	<i>0,055784655</i>	<i>0,027892327</i>	<i>0,083676982</i>
4	<i>456,96</i>	<i>3</i>	<i>0,11156931</i>	<i>0,083676982</i>	<i>0,195246292</i>
5	<b>k</b>	<i>4</i>	<i>0,223138619</i>	<i>0,195246292</i>	<i>0,418384911</i>
6	<i>2</i>	<i>5</i>	<i>0,446277239</i>	<i>0,418384911</i>	<i>0,86466215</i>
7	<b>M</b>	<i>6</i>	<i>0,892554477</i>	<i>0,86466215</i>	<i>1,757216627</i>
8	<i>14</i>	<i>7</i>	<i>1,785108954</i>	<i>1,757216627</i>	<i>3,542325581</i>
9		<i>8</i>	<i>3,570217909</i>	<i>3,542325581</i>	<i>7,11254349</i>
10		<i>9</i>	<i>7,140435818</i>	<i>7,11254349</i>	<i>14,25297931</i>
11		<i>10</i>	<i>14,28087164</i>	<i>14,25297931</i>	<i>28,53385094</i>
12		<i>11</i>	<i>28,56174327</i>	<i>28,53385094</i>	<i>57,09559421</i>
13		<i>12</i>	<i>57,12348654</i>	<i>57,09559421</i>	<i>114,2190808</i>
14		<i>13</i>	<i>114,2469731</i>	<i>114,2190808</i>	<i>228,4660538</i>
15		<i>14</i>	<i>228,4939462</i>	<i>228,4660538</i>	<i>456,96</i>

Рисунок 3.10 – Смуги частот АЧЧС вібросигналу гідроагрегата Нижньодністровської ГЕС при коефіцієнті стискання 2

Відомо, що частота обертання ротора (генераторна частота) гідроагрегатів Нижньодністровської ГЕС дорівнює 1,785 Гц.

Електродинамічні складові вібрації прямо пропорційні навантаженню гідрогенератора, а їх основний вплив зосереджений на генераторній частоті ( $f_r$ ) та на найближчих до неї гармоніці ( $2f_r$ ) та субгармоніці ( $\frac{f_r}{2}$ ) [7, 55].

З рис. 3.10 видно, що генераторна частота міститься на початку сьомої смуги частот, відповідно найближча гармоніка – в восьмій смузі, а найближча субгармоніка – в шостій.

З табл. 3.3, 3.4 видно, що саме в цих смугах частот при зростанні навантаження гідрогенератора суттєво збільшуються коефіцієнти взаємкореляції. Це підтверджує гіпотезу про те, що значення коефіцієнта взаємної кореляції між вібросигналами у досліджуваних вузлах буде зростати при наближенні точки прикладання значущої складової зовнішнього збурення до умовної точки механічного центра між ними, а також буде пропорційним відносному вкладу цієї збурюючої сили у формуванні загального вібросигналу.

Таким чином, можна вважати повністю доведеним ефективність використання коефіцієнтів взаємкореляції не лише у якості вагових коефіцієнтів ШНМ, але і як додаткову ознаку наявності в певних смугах частот тих чи інших складових вібрації.

Після визначення допоміжних параметрів, нарешті розглянемо попередні діагностичні висновки.

### ***Попередні діагностичні висновки***

На основі алгоритму, зображеного на рис. 3.5, була розроблена програма, фрагмент інтерфейсу якої показано на рис. 3.11.



Рисунок 3.11 – Фрагмент інтерфейсу програми діагностування існуючих дефектів гідроагрегату

Цифрами 1–4 пронумеровані блоки нейронів, які обробляють вібросигнали від вібросенсорів, встановлених на турбінному і опорно-упорному підшипниках по горизонтальній та вертикальній осях.

Блоки нейронів першого шару уточнюють фонові значення вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот АЧЧС, залежності цих коефіцієнтів від потужності навантаження гідроагрегату та напору води і вагові коефіцієнти. Другий шар нейронів забезпечує формування перерізів АЧЧС кожного вібросигналу в моменти часу з надмірним віброзміщенням та відокремлення фонових, гідродинамічних та електродинамічних складових АЧЧС кожного вібросигналу від складових, які викликані механічними дефектами гідроагрегату.

Для цього у вікні, що зображене на рис. 3.12, для кожного нейрона вводиться така додаткова інформація:

1. Вектор фонових значень для випадку паралельної роботи з першим, другим або одночасно з двома гідроагрегатами (кнопка «Спектр шуму»).
2. Вектор коефіцієнтів  $v_j$  (кнопка «Потужність»).
3. Вектори коефіцієнтів  $p_j$ ,  $q_j$  (кнопки «Q» та «P»).
4. Максимально припустиме віброзміщення (віконце «Задати максимальне відхилення»).
5. Поточне значення потужності (віконце «Задати потужність»).
6. Поточне значення рівня води (віконце «Задати рівень води»).

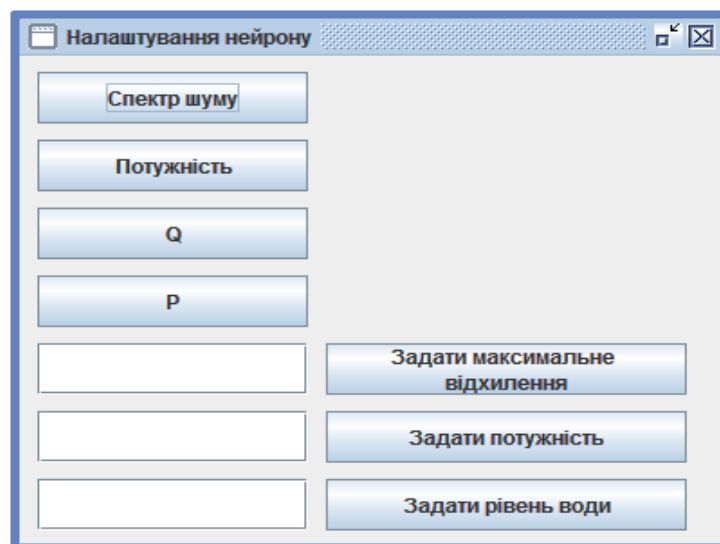


Рисунок 3.12 – Додаткова інформація другого шару нейронів

Функціонування нейронів третього шару теж потребує додаткової інформації, яка вводиться у вікні, що показано на рис. 3.13. В цьому

вікні для нейронів третього шару (кожен з яких відповідає за певну причину виникнення вібрації) має бути введено дві множини, а саме: множина номерів смуг частот  $\Psi$  і множина вагових коефіцієнтів (коефіцієнтів взаємкореляції).



Рисунок 3.13 – Додаткова інформація третього шару нейронів

Результат роботи програми з архівними даними зображено на рис. 3.14.



Рисунок 3.14 – Результат роботи програми з архівними даними

З цих результатів видно, що на той час, якому відповідають архівні дані, з найвищим рівнем вірогідності надмірне віброзміщення було наслідком гідродинамічних та електродинамічних причин. Певний вклад у надмірне віброзміщення дають і дефекти підшипників. Що ж стосується інших чинників, то їх вплив на вібраційні процеси на цей час був незначним.



## **4 ПІДСИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ**

### **4.1 Структура та принципи побудови підсистеми прогнозування розвитку дефектів**

Структура підсистеми прогнозування розвитку дефектів аналогічна наведеній на рис. 3.1.

Ця підсистема призначена для отримання прогнозних висновків щодо можливого розвитку дефектів гідроагрегату.

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

Вхідні дані підсистеми прогнозування, які надходять від підсистеми моніторингу містять в собі:

1. Масиви значень вібросигналів, які підсистема моніторингу отримує з вимірювальних каналів вібрації (кількість масивів дорівнює кількості вібросенсорів). Для адекватного функціонування підсистеми прогнозування тривалість кожного масиву має бути досить великою.

2. Масив значень навантаження гідрогенератора для кожного моменту часу такої ж тривалості.

3. Масив значень напору води для кожного моменту часу такої ж тривалості.

Далі ці масиви значень надходять в ШНМ.

Побудову ШНМ і процедури прогнозування розглянемо детальніше.

### **4.2 Штучна нейроподібна мережа для прогнозування розвитку дефектів**

Побудова ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату базується на тих же принципах, що і попередня ШНМ для діагностування, але має деякі особливості [57, 58].

Звичайно, регулярно аналізуючи щодобові дані  $\{RV_{1t}, RV_{2t}, RV_{3t}, RV_{4t}, RV_{5t}, RV_{6t}\}$  можна досить адекватно спрогнозувати розвиток дефектів і, у випадку небезпеки, зупинити гідроагрегат та провести технічний огляд і необхідні ремонтні роботи.

Разом з тим, небезпечні дефекти можуть розвиватися поступово, не приводячи на ранній стадії до надмірних віброзміщень, і цей поступовий розвиток необхідно окремо відслідковувати. Тому математи-

чна модель ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату дещо відрізняється від попередньої.

### ***Загальна структура ШНМ САДП-РДГ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату***

Структура ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату аналогічна зображеній на рис. 3.4 за єдиним винятком – до неї не надходять неприпустимі значення віброзміщення та їх часові фіксації, в яких немає потреби.

Кількість вхідних нейронів в цій ШНМ дорівнює  $NM + 3$ .

Перший шар ШНМ виконує ті ж самі функції, що і перший шар попередньої ШНМ.

Нейрони другого шару призначені для формування трендів кожної смуги частот АЧЧС кожного вібросигналу. Для побудови тренду з кожного рядка АЧЧС, який відповідає окремому стеку даних і півхвилинному інтервалу часу, вибирається максимальне (за абсолютною величиною) значення вейвлет-коефіцієнта.

Далі цей тренд аналізується протягом відносно значного проміжку часу, наприклад, доби (розмір цього проміжку повинен бути уточнений під час дослідної експлуатації САДП-РДГ). Якщо в результаті аналізу спостерігається впевнене зростання максимального значення вейвлет-коефіцієнтів деяких смуг частот АЧЧС, то ці тренди передаються на вхід нейронів другого шару ШНМ разом з параметрами  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $P$ ,  $D_{0xyj}$ ,  $v_j$ ,  $p_j$ ,  $q_j$  та  $w_{kij}$ .

Третій шар ШНМ містить 6 нейронів, кожен з яких відповідає одному з чинників, які є причинами виникнення вібрацій.

Кожний нейрон третього шару отримує всі зростаючі тренди смуг частот, а також дані про можливу залежність цих смуг відповідної АЧЧС від гідродинамічних та електродинамічних чинників і фонові спектральні характеристики.

Кожен нейрон третього шару визначає рівень вірогідності того, що причиною зростання вейвлет-коефіцієнтів є характерний чинник вібрації, якій відповідає цьому нейрону.

Очевидно, що ця ШНМ спрацьовує лише у випадку, коли існує хоча б один зростаючий тренд.

**Математична модель та алгоритм ШНМ САДП-РДГ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату**

Як вже було сказано вище, призначенням нейронів другого шару є побудова трендів вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот АЧЧС кожного з вібросигналів за певні проміжки часу. Кожен тренд  $T_{ij}$  є числовою множиною, тобто можна записати [59, 60]

$$\begin{aligned} \forall i = 1, N \forall j = 1, M \forall r = \\ = 1, R \left( T_{ij} = \left\{ |d_{ij1}^{\max}|, |d_{ij2}^{\max}|, \dots, |d_{ijr}^{\max}|, \dots, |d_{ijR}^{\max}| \right\} \right), \end{aligned} \quad (4.1)$$

де  $N$  – кількість вібросенсорів;  $R$  – кількість стеків вхідних даних розміром по 32768 значень, отриманих від вібросенсорів за заданий проміжок часу;  $|d_{ijr}^{\max}|$  – максимальне абсолютне значення вейвлет-коефіцієнта  $j$ -ї смуги частот АЧЧС  $i$ -го вібросигналу, що відповідає  $r$ -му стеку вхідних даних.

Далі виконується аналіз кожного тренду з метою виявлення стабільного зростання абсолютних максимальних значень вейвлет-коефіцієнтів.

Критерій оцінки такого зростання протягом дослідної експлуатації САДП-РДГ може уточнюватись, але апріорі прийнятий таким [61]:

$$\frac{\sum_{r=1}^N |d_{ijr}^{\max}|}{R} - \frac{\sum_{r=1}^{\frac{N}{2}} |d_{ijr}^{\max}|}{\frac{R}{2}} > \varepsilon, \quad (4.2)$$

де  $\varepsilon$  – параметр, який характеризує ступінь зростання тренду.

Значення  $\varepsilon$  має уточнюватись в процесі дослідної експлуатації САДП-РДГ, а спочатку його можна прийняти рівним 10 % середнього значення вейвлет-коефіцієнтів тренду, тобто

$$\varepsilon = 0,1 \cdot \frac{\sum_{r=1}^N |d_{ijr}^{\max}|}{R}. \quad (4.3)$$

Після проведення аналізу всі тренди  $T_{ij}$  зі стабільним зростанням вейвлет-коефіцієнтів (і лише вони) разом з параметрами  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $P$ ,

$D_{0xyj}$ ,  $v_j$ ,  $p_j$ ,  $q_j$  та  $w_{kij}$  надходять до другого шару ШНМ. Позначимо ці тренди  $T_{ij}^\uparrow$ .

Кожен нейрон третього шару ШНМ повинен виконувати такі процедури:

1. Спочатку визначається множина  $Z$ , яка містить останні елементи кожного зростаючого тренду

$$\forall \left| d_{ijR}^{max} \right| \in T_{ij}^\uparrow \left( \left| d_{ijR}^{max} \right| \in Z \right). \quad (4.4)$$

2. Далі для кожного елемента множини  $Z$  слід відокремити фонову, гідродинамічну та електродинамічну спектральні складові від складових, які викликані іншими чинниками, а саме:

- для перших чотирьох нейронів, які характеризують безпосередньо механічні дефекти гідроагрегату це виконується за формулою

$$\forall k = 1, 4 \forall \left| d_{ijR}^{max} \right| \in Z \left( d_{kij}^* = \left| d_{ijR}^{max} \right| - D_{0xyj} - v_j P - \frac{1}{p_j + q_j (H_1 - H_2)^2} \right). \quad (4.5)$$

Якщо  $d_{kij}^* < 0$ , то це значення обнулюється;

- для п'ятого нейрона, який повинен діагностувати порушення гідродинаміки потоку, можна записати

$$\forall \left| d_{ijR}^{max} \right| \in Z \left( p_j \neq 0 \wedge q_j \neq 0 \Rightarrow d_{5ij}^* = \frac{1}{p_j + q_j (H_1 - H_2)^2} \right); \quad (4.6)$$

- для шостого нейрона, який повинен діагностувати електродинамічну складову вібрації, можна записати

$$\forall \left| d_{ijR}^{max} \right| \in Z \left( v_j \neq 0 \Rightarrow d_{6ij}^* = v_j P \right). \quad (4.7)$$

3. Наступним кроком є нормування всіх елементів  $d_{kij}^*$ , яке виконується з формулою

$$\forall k = 1, 6 \forall \left| d_{ijR}^{max} \right| \in Z \left( d_{kij}^{norm} = \frac{d_{kij}^*}{\sum_{k,i,j} d_{kij}^*} \right). \quad (4.8)$$

4. Показник вірогідності  $PV_k$  чинника, який відповідає  $k$ -му нейрону, визначається як

$$\forall k = 1, 6 \forall \left| d_{ijN}^{\max} \right| \in Z \forall j \in \Psi_k \left( PV_k = \sum_{i,j} w_{kij} d_{kij}^{norm} \right), \quad (4.9)$$

а рівень вірогідності  $k$ -го нейрона

$$RV_k = \frac{PV_k}{\max(PV_1, PV_2, PV_3, PV_4, PV_5, PV_6)}. \quad (4.10)$$

Отже, результуючий діагностичний висновок може бути сформульований як множина значень рівнів вірогідності різних чинників вібрації  $\{RV_1, RV_2, RV_3, RV_4, RV_5, RV_6\}$ .

На рис. 4.1 зображено блок-схему алгоритму, який відповідає наведеній вище математичній моделі.

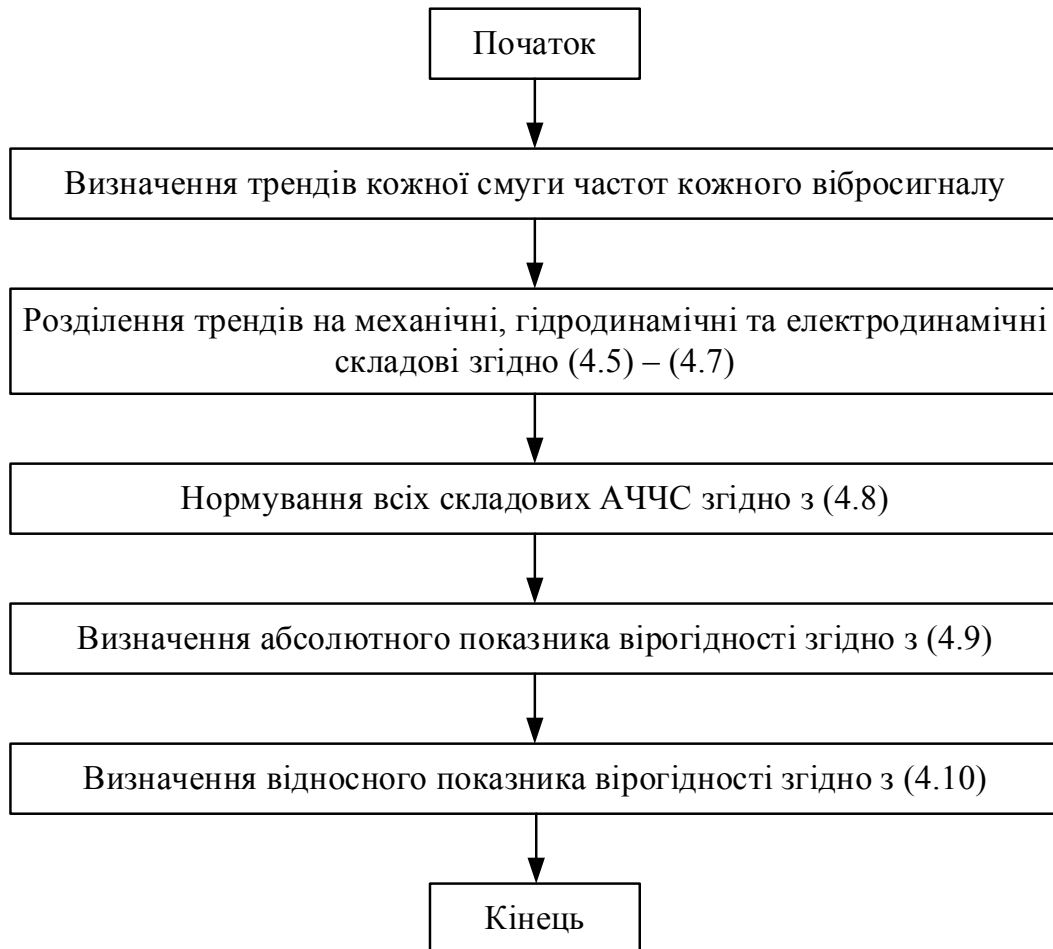


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритму ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату

В наступному підрозділі розглядаються приклади діагностичних висновків, отримані для гідрогенераторів Нижньодністрівської ГЕС.

### 4.3 Попередні прогностні висновки щодо розвитку дефектів гідроагрегатів Нижньодністровської ГЕС

Визначення фонових, електро- та гідродинамічних складових АЧЧС вібросигналів, а також вагових коефіцієнтів ШНМ наведено в підрозділі 3.4.

Далі розглянемо декілька прикладів, отриманих за допомогою програми, реалізованої за алгоритмом, зображеним на рис. 4.1.

На рис. 4.2 зображено тренд 7-ї смуги частот АЧЧС вібросигналу, отриманий від вібросенсора, встановленого на турбінному підшипнику. Навіть без використання критерію (4.2) видно, що цей тренд є практично незмінним і немає потреби передавати його на нейрони другого шару ШНМ.

Більш цікавим є тренд, зображений на рис. 4.3.

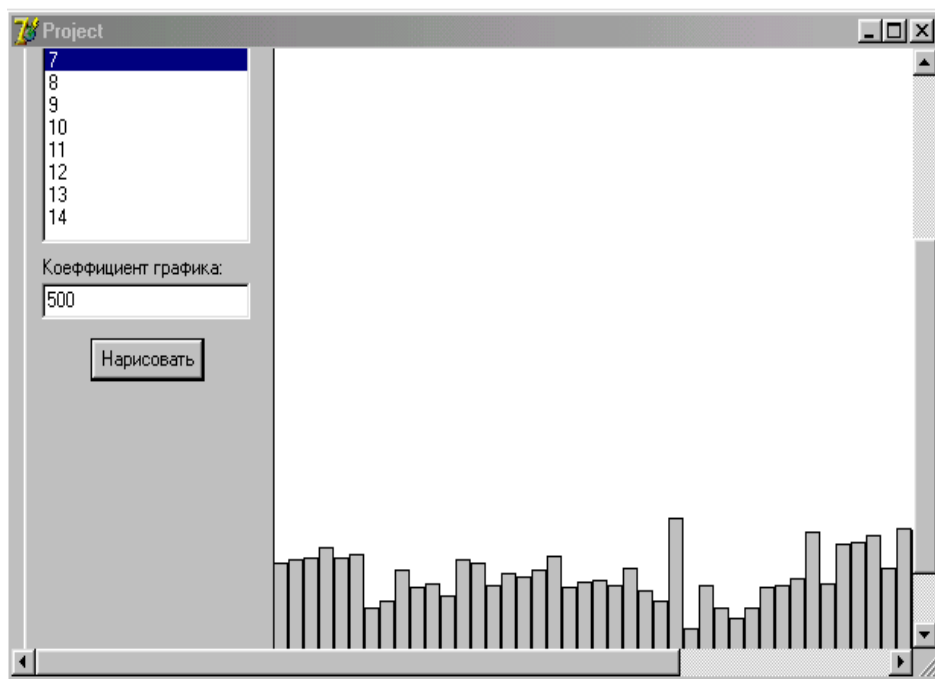


Рисунок 4.2 – Тренд 7-ї смуги частот АЧЧС вібросигналу

В цьому випадку, доцільно передати цей тренд до другого шару нейронів і дослідити причини його зростання, оскільки воно, цілком можливо, може бути викликане тимчасовим падінням напору води або зростанням потужності навантаження гідрогенератора.

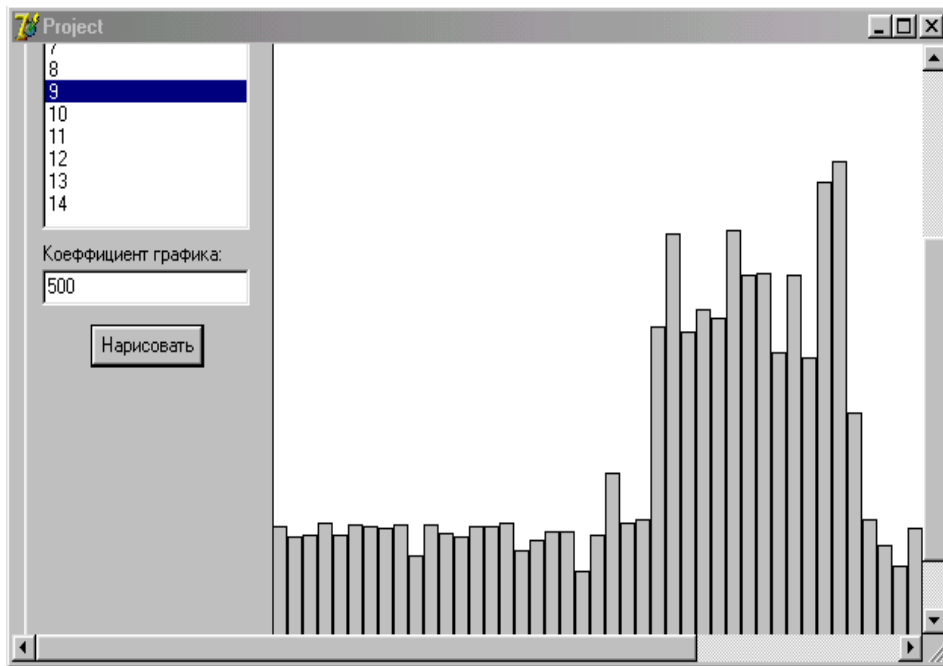


Рисунок 4.3 – Тренд 9-ї смуги частот АЧЧС вібросигналу

Аналогічна ситуація (навіть ще яскравіше виражена) спостерігається в тренді 10-ї смуги частот вібросигналу від вібросенсора, встановленого на опорно-упорному підшипнику (рис. 4.4).

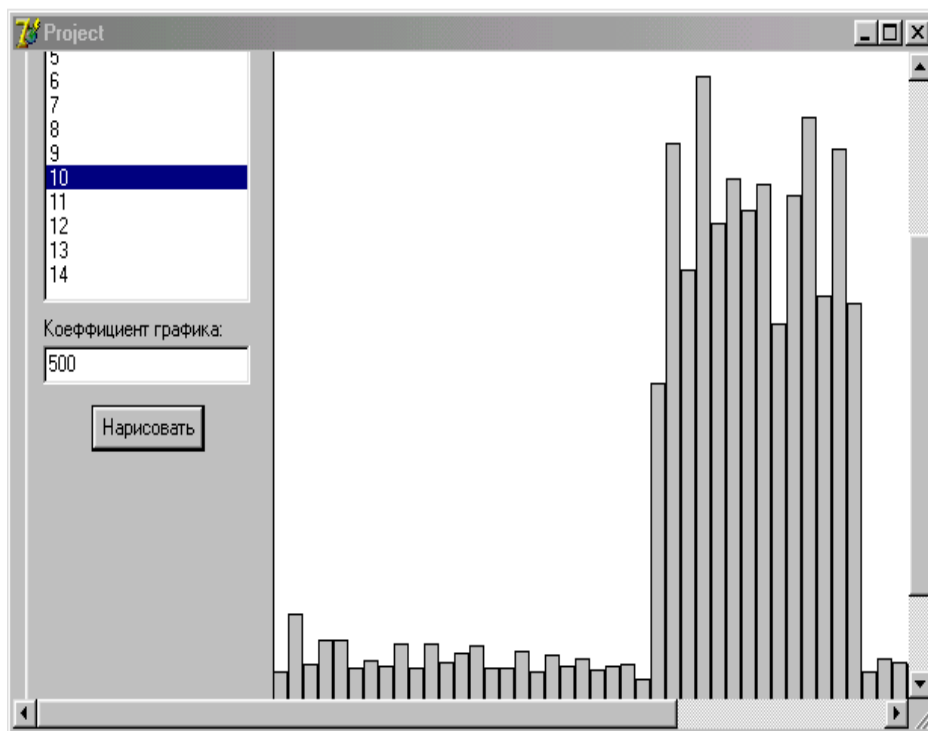


Рисунок 4.4 – Тренд 10-ї смуги частот АЧЧС вібросигналу

Як вже було сказано, настроювання нейроподібної мережі САДП-РДГ передбачається протягом її дослідної експлуатації.

Разом з тим, аналізуючи архівні дані підсистеми моніторингу, можна отримати окремі попередні результати, що й буде наведено далі.

Фрагмент інтерфейсу програми, яка реалізує алгоритм (див. рис. 4.1), показано на рис. 4.5.

Цифрами 1–4 пронумеровані блоки нейронів, які обробляють вібросигнали від вібросенсорів, встановлених на турбінному і опорно-упорному підшипниках по горизонтальній та вертикальній осі.



Рисунок 4.5 – Фрагмент інтерфейсу програми прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату



Блоки нейронів першого шару виконують ті ж самі функції, що і в програмі діагностування.

Другий шар нейронів забезпечує формування трендів кожної смуги частот АЧЧС кожного вібросигналу та відокремлення фонових, гідродинамічних та електродинамічних складових АЧЧС кожного вібросигналу від складових, які викликані механічними дефектами гідроагрегату.

Для цього у вікні, що зображене на рис. 4.6, для кожного нейрона вводиться така додаткова інформація:

1. Вектор фонових значень для випадку паралельної роботи з першим, другим або одночасно з двома гідроагрегатами (кнопка «Спектр шуму»).
2. Вектор коефіцієнтів  $v_j$  (кнопка «Потужність»).
3. Вектори коефіцієнтів  $p_j$ ,  $q_j$  (кнопки «Q» та «P»).
4. Коефіцієнт зростання тренду (віконце «Задати максимальне зростання»).
5. Поточне значення потужності (віконце «Задати потужність»).
6. Поточне значення рівня води (віконце «Задати рівень води»).

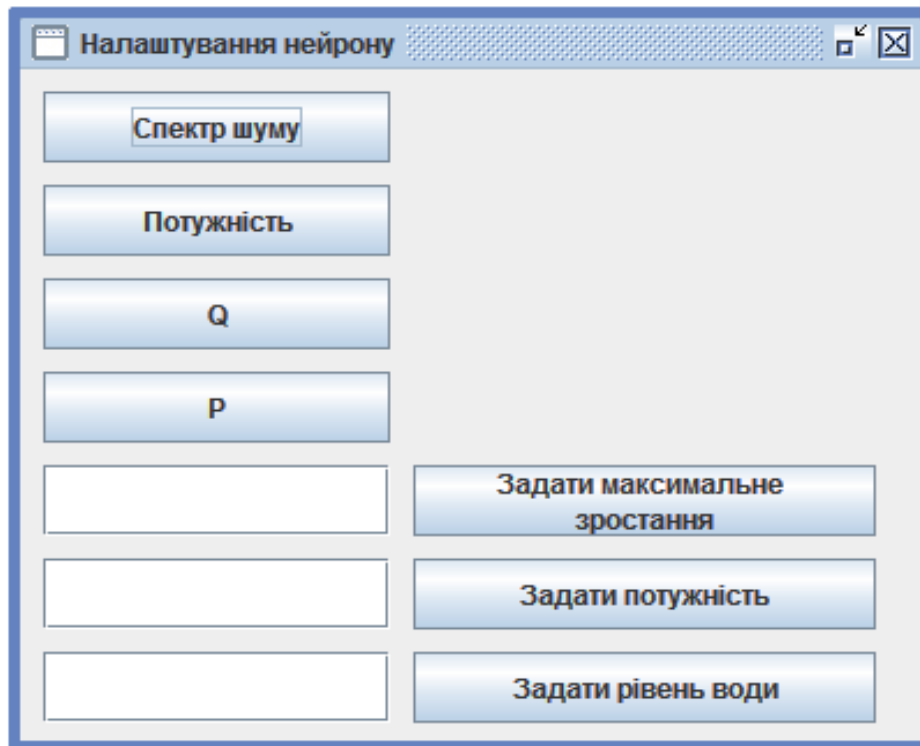


Рисунок 4.6 – Додаткова інформація другого шару нейронів

Додаткова інформація для функціонування нейронів третього шару така ж сама, як і в задачі діагностування (див. рис. 3.13).

Результат роботи програми з архівними даними зображено на рис. 4.7.



Рисунок 4.7 – Результат роботи програми з архівними даними

Оскільки і діагностування, і прогнозування базувалося на архівних даних за один і той же період часу, то зрозуміло, чому результати дуже близькі. Єдина різниця полягає у впливі на вібрацію дефектів турбінного та опорно-упорного підшипників: якщо в момент надмірного віброзміщення вони дещо відрізняються, то протягом більшого проміжку часу ця різниця практично нівелюється.

## ВИСНОВКИ

В роботі на основі виконаних досліджень розвинуто теоретичні, метрологічні та інженерно-технічні основи технічного контролю та діагностування гідроагрегатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні та розробці нових методів та засобів вимірювання і контролю параметрів гідроагрегатів, які дозволяють в умовах промислової експлуатації забезпечити високу вірогідність контролю технічних параметрів та діагностування гідроагрегатів.

Основні наукові та прикладні результати роботи такі.

1. Розроблено універсальні принципи побудови та структуру системи автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів, що дозволило уніфікувати конструкцію системи для різних типів ГЕС та ГАЕС з різною потужністю та кількістю силових агрегатів.

2. Проаналізовано та розвинуто математичні моделі первинних вимірювальних перетворювачів віброприскорення, що дозволило адаптувати їх для використання у якості рівнянь перетворення засобів вимірювання.

3. Запропоновано метод та засіб вилучення гравітаційної складової похибки засобів вимірювання віброприскорення, що дозволило суттєво підвищити їх точність.

4. Запропоновано застосування та доведено ефективність математичного апарату вейвлет-перетворень для спектрального аналізу вібросигналів, що дає можливість отримати тривимірний амплітудно-частотно-часовий спектр вібросигналу зі змінною шириною вікна, який забезпечує оптимальну розрізнявальну здатність спектральних характеристик.

5. Показано неефективність застосування чітких детермінованих математичних моделей для аналізу вібросигналу просторово розподіленої багатозв'язної квазілінійної системи гідроагрегату. Доведено перспективність використання штучної нейроподібної системи для аналізу такої системи, що дозволяє створити автоматизовану комп'ютерну систему діагностування та прогнозування дефектів, яка

здатна до самостійного настроювання при зміні спектральних характеристик.

6. Розроблено універсальні принципи побудови та структуру підсистеми діагностування гідроагрегатів та запропоновано нові високоінформативні ознаки наявності дефектів обладнання, що дозволило суттєво підвищити вірогідність діагностування наявності дефектів та виявлення місця їх виникнення.

7. Розроблено універсальні принципи побудови та структуру підсистеми прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів на основі використання штучної нейроподібної мережі, що дозволяє оцінити залишковий ресурс силового обладнання.

8. Побудовано дослідні прототипи підсистем моніторингу, діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів, що успішно проходять дослідну експлуатацію на потужності Нижньодністровської ГЕС.

## 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. Кацев, 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 контролю динамічних параметрів електричних машин : монографія / В. В. Кухарчуку. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 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. // Радиоизмерения. – 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. – Вінниця : 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. Vedmitskiy, V. V Kukharchuk, V. F. Hraniak and other // *Przeglad elektrotechniczny* – 2017. – № 3. – P. 69–72.

23. Кухарчук В. В. Математична модель мікропереміщень оптико-цифрового сенсора / В. В. Кухарчук, В. Й. Білінський // *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. Каців // 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. Каців, 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. Каців С. Ш. Штучна нейроподібна мережа для діагностування дефектів гідроагрегатів / С. Ш. Каців // 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. Каців, 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. Каців, 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. Каців // 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 стискування / 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.

## ДОДАТОК А

### Технічні характеристики системи моніторингу

Діапазон вимірювання середніх квадратичних значень вібрації:

- віброприскорення –  $0,1...180 \text{ м/с}^2$ ;
- віброшвидкість –  $0,1...100 \text{ мм/с}$ ;
- віброзміщення –  $1...1000 \text{ мкм}$ .

Діапазон вимірювання частоти обертання від 60 до 3000 об/хв.

Максимально допустимі значення вібрацій на конструктивних елементах гідроагрегату встановлюються 160 мкм, а на конструктивних елементах вентиляторів 113 мкм.

Форма передачі вихідних даних – послідовний код.

Інтерфейс зв'язку з персональним комп'ютером – RS-485.

Напруга живлення – 9 В постійного струму.

Струм споживання –  $\leq 12 \text{ мА}$ .

Габаритні розміри:

- модуль управління і обробки  $140 \times 45 \times 35 \text{ мм}$ ;
- сенсор вібрацій  $\varnothing 30 \times 30 \text{ мм}$ .

Кліматичне виконання ВКВ – звичайне.

Виконання по захищеності від впливу зовнішнього середовища – вологостійке.

Умови експлуатації системи моніторингу:

- напруга живлення (за межами капсули) –  $\approx 220 \text{ В} +10 \%...-15 \%$ ;  
(в капсулі) –  $+ 9 \text{ В}$ ;
- температура навколишнього середовища для вимірювального каналу –  $-20...+50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура навколишнього середовища для системного комп'ютера –  $+10...+45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вологість не повинна перевищувати –  $100 \%$ ;
- атмосферний тиск –  $86...108 \text{ кПа}$ .

## ДОДАТОК Б

### Інструкція оператора системи моніторингу

#### **Б.1 Загальні відомості**

Програмне забезпечення VibroMonitor призначене для візуального спостереження за процесами зміни вібрацій вузлів гідроагрегатів та вчасного попередження виникнення дефектів під час тривалої експлуатації.

Програма дозволяє спостереження за рівнем вібрації трьох гідроагрегатів одночасно, який характеризується відповідним кольоровим забарвленням кожного вузла окремо та агрегату в цілому.

У випадку, коли вузол знаходиться в робочому стані і рівень вібрації відповідає номінальному, то він має *зелене* забарвлення. Коли рівень вібрації перевищує номінальний на 25 %, тоді вузол підсвічується *жовтим* кольором, що є сигналом попередження про можливий аварійний чи перед аварійний стан останнього. У випадку коли рівень вібрації досягає максимально допустимого, тоді вузол забарвлюється в *червоний* колір, що вимагає термінового втручання.

Вузол та гідроагрегат в неробочому стані позначаються *сірим* та *темно-сірим* кольорами, відповідно.

Крім того, існує можливість детального перегляду трендів вібраційного зміщення протягом періоду експлуатації для кожного вузла гідроагрегату.

Сигналізація про можливі аварійні ситуації здійснюється в автоматичному режимі, шляхом представлення на екрані монітора тих частин гідроагрегату, які потребують невідкладної уваги, та відповідними звуковими сигналами.

Контролю підлягають такі вузли гідрогенераторів:

1. Турбінний підшипник 1 (контроль **у** двох осях: горизонтальна та вертикальна).
2. Упорно-опорний підшипник 2 (горизонтальна та вертикальна осі).
3. Маслоприймач 3 (горизонтальна вісь).
4. Вентилятори 4–1 та 4–2 (горизонтальна вісь).

#### **Б.2 Опис меню та вікон**

##### **Б.2.1 Головне меню**

Головне меню (рис. Б.1) призначене для швидкого доступу до розділів програми

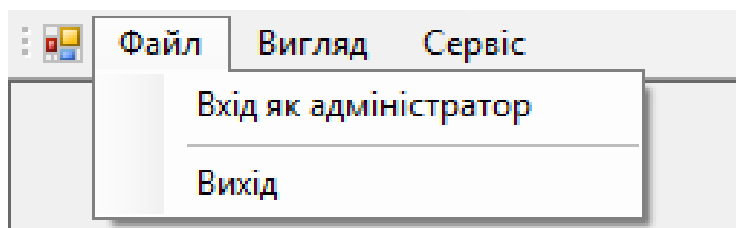


Рисунок Б.1 – Головне меню

Меню *Файл–Вхід як адміністратор* дозволяє увійти в систему з додатковими правами для здійснення налаштувань (рис. Б.2).

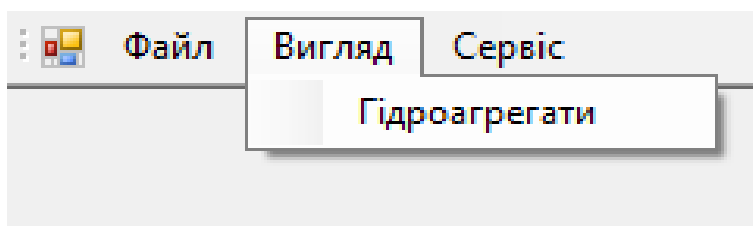


Рисунок Б.2 – Меню налаштувань

Меню *Вигляд–Гідроагрегати* дозволяє відкрити вікно загального вигляду у випадку помилкового його закриття.

#### *Б.2.2 Вікно загального вигляду гідроагрегатів*

Після завантаження програми на екрані монітора з'являються мнемонічні схеми (рис. Б.3) одночасно трьох агрегатів з поточними значення віброзміщення вузлів.

Кожна з мнемонічних схем містить такі вузли, що підлягають моніторингу вібраційного стану:

1. Турбінний підшипник 1.
2. Упорно-опорний підшипник 2.
3. Маслоприймач 3.
4. Вентилятори 4–1 та 4–2.

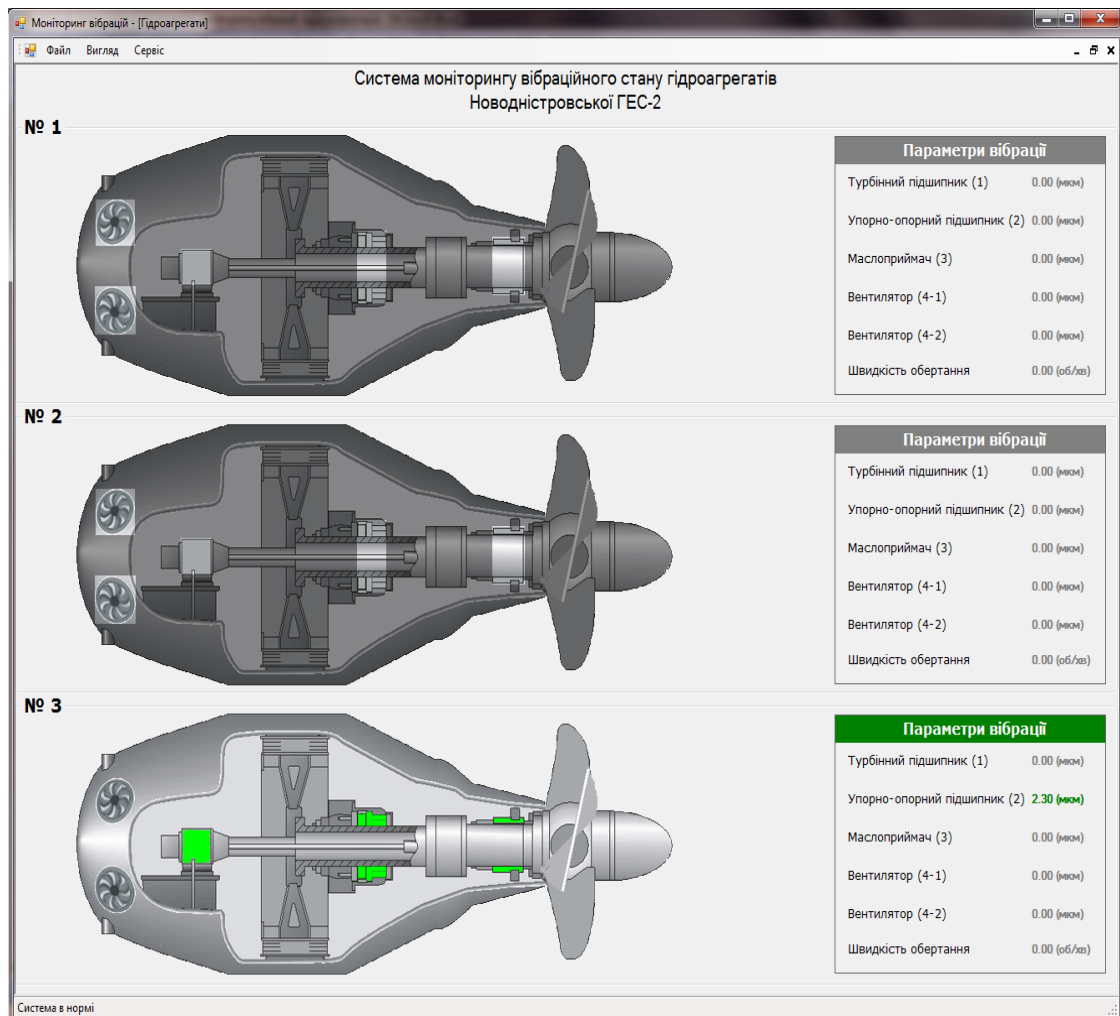


Рисунок Б.3 – Мнемосхема гідроагрегатів

Праворуч від схеми гідроагрегату наведено таблицю «*Параметри вібрації*», що містить значення віброзміщення (в мкм) для кожного вузла. У випадку перевищення рівня вібрації вузла гідроагрегату на 25 % мнемонічна схема, заголовок таблиці «*Параметри вібрації*» та відповідні числові значення відображаються *жовтим* кольором. При досягненні порогових значень вібрації колір змінюється на *червоний*. В робочому стані вузли агрегату відображається *зеленим* кольором.

### Б.2.3 Вікно детального перегляду

Після подвійного натиснення на одній з мнемосхем гідроагрегатів, на екрані монітора (рис. Б.4) з'являється вікно детального перегляду показників вібраційного стану. Для кожного з перерахованих вузлів у п. Б.2 наведено графічні залежності зміни віброзміщення в часі. Також графічно показано порогові значення вібрації для рівнів попереджен-

ня та небезпечного, що відображається *жовтим* та *червоними* кольорами відповідно.

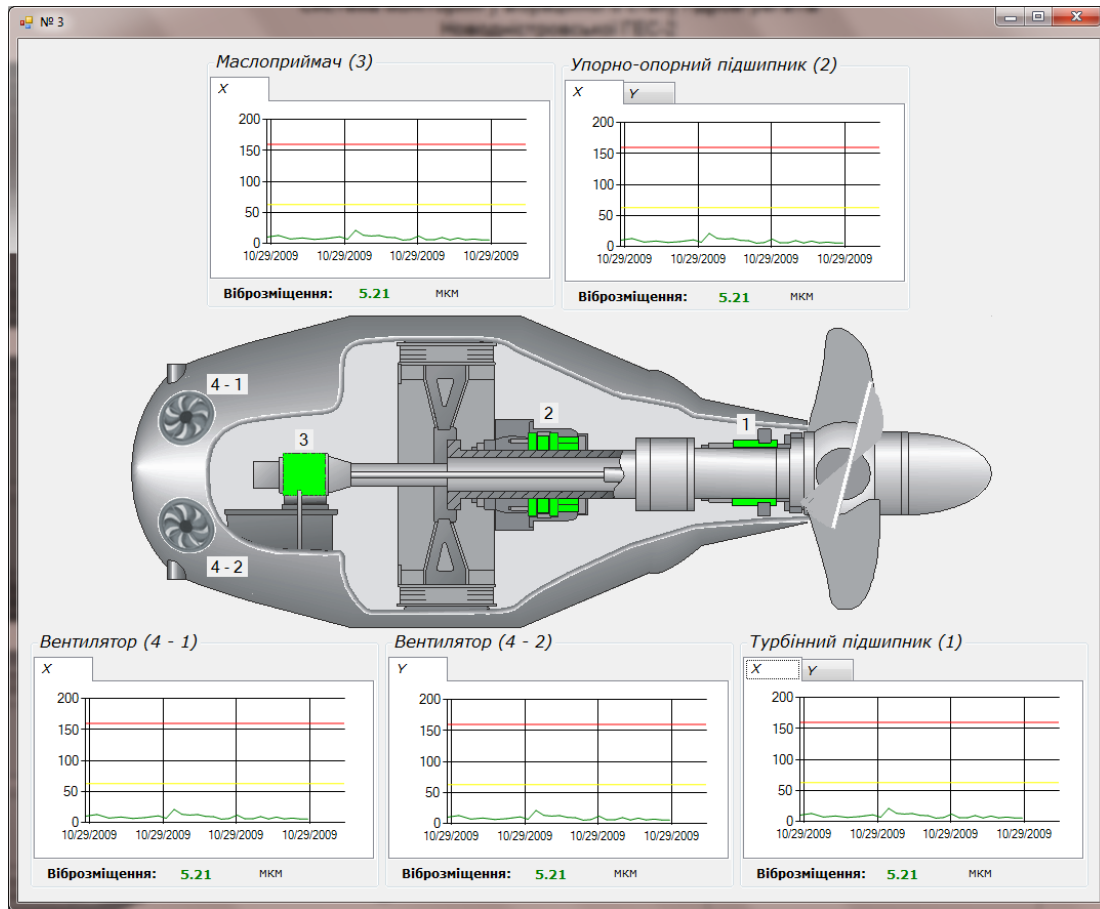


Рисунок Б.4 – Результати моніторингу

### ***Б.3 Порядок запуску та роботи***

1. Під'єднати вимірювальні модулі до комп'ютера.
2. Запустити комп'ютер.
3. Зачекати 2–3 хвилини після запуску (система здійснить автоматичне самотестування).
4. Запустити програму «VibroMonitor» на робочому столі комп'ютера або за адресою «C:\ProgramFiles\VibroMonitor\VibroMonitor.exe».
5. На екрані монітора відобразяться мнемонічні схеми гідроагрегатів, доступ до яких також можна здійснити через меню *Вигляд–Гідагрегати*.
6. Для перегляду детальної інформації натиснути двічі на необхідному гідроагрегаті.

# ДОДАТОК В

## Схеми електричні принципи

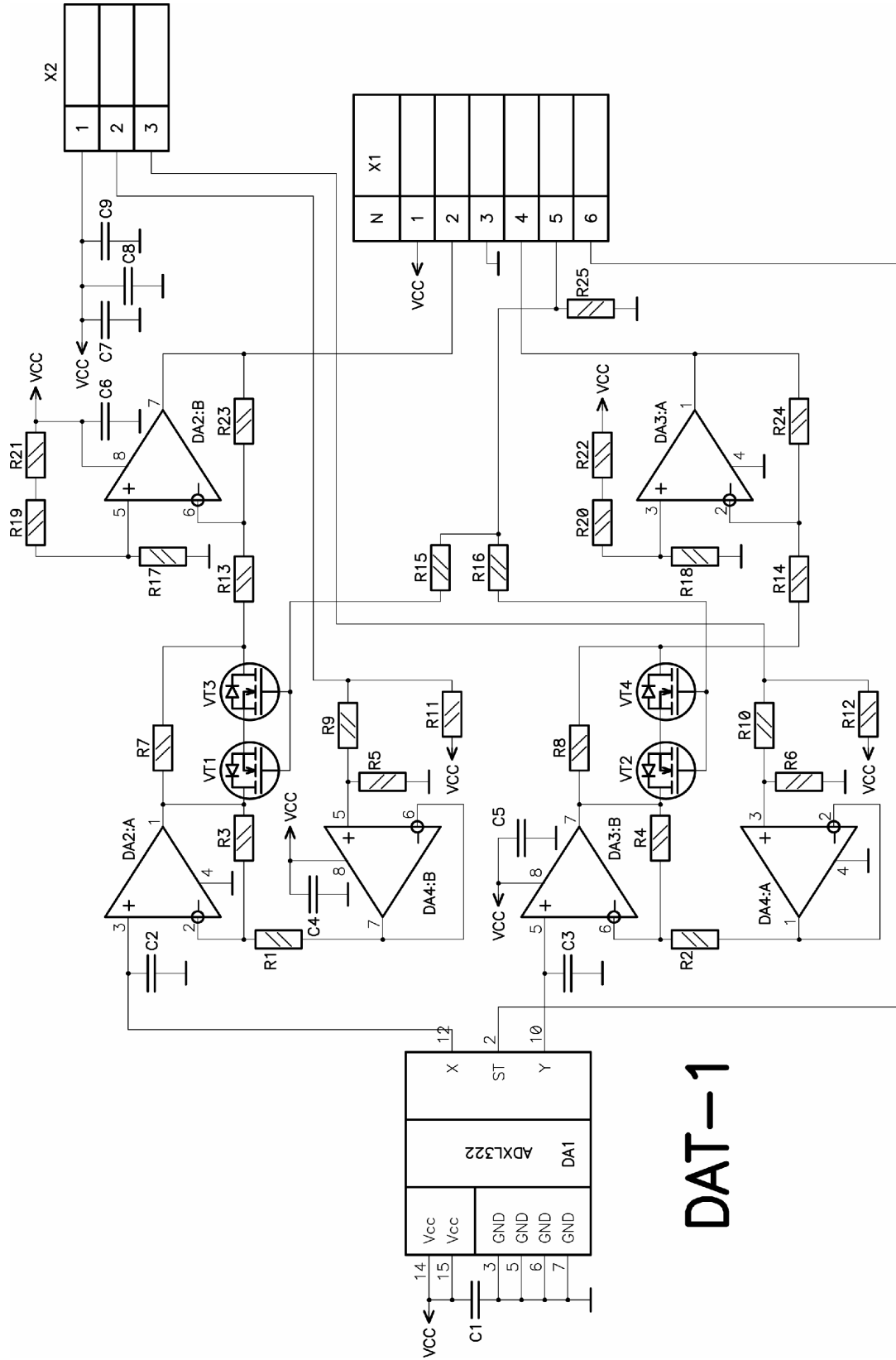


Рисунок В.1 – Схема електрична принципова плати вібросенсора

**DAT-1**



# Mod-1

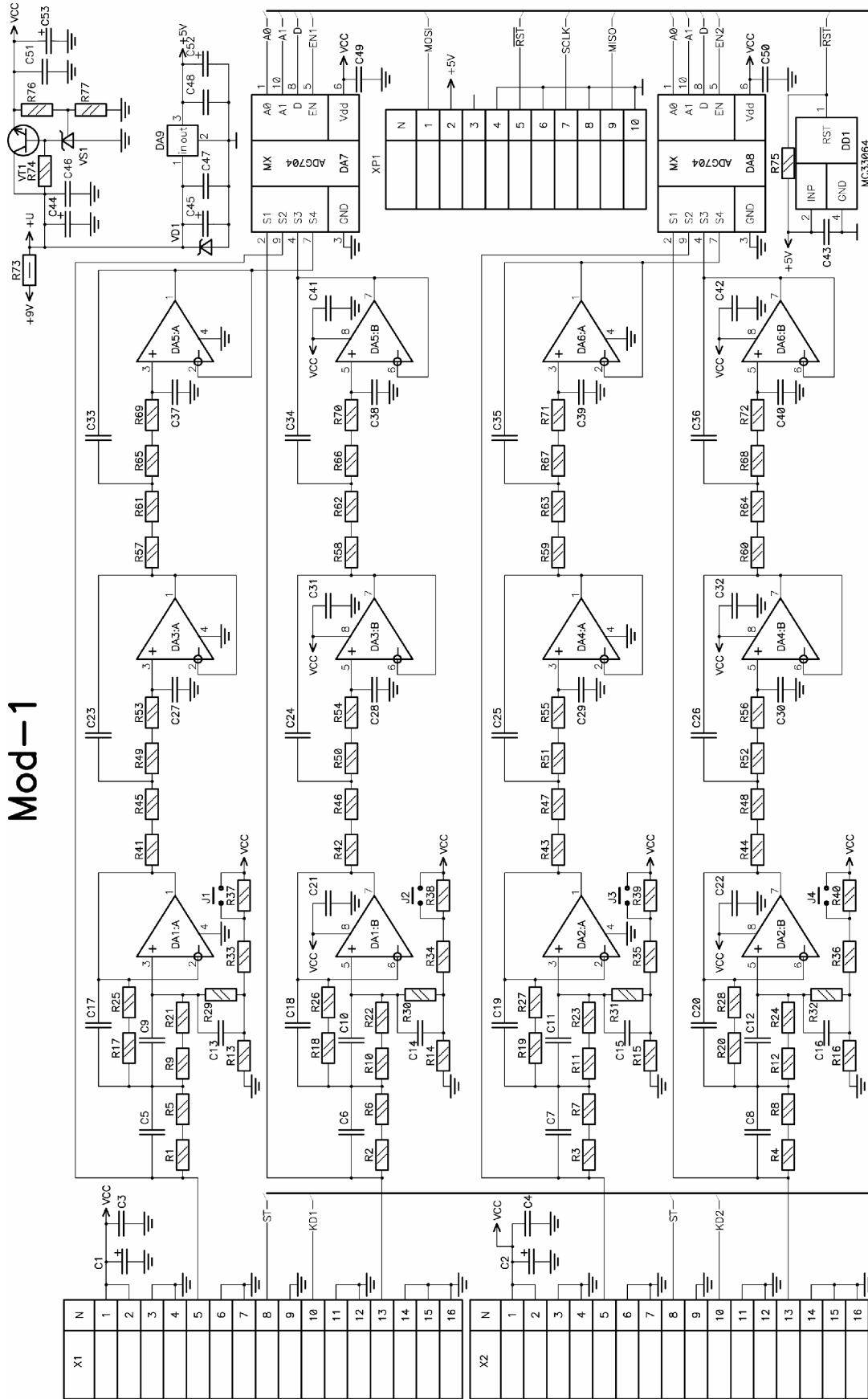


Рисунок В.2 – Схема електрична принципова мікропроцесорного блока УО (початок)

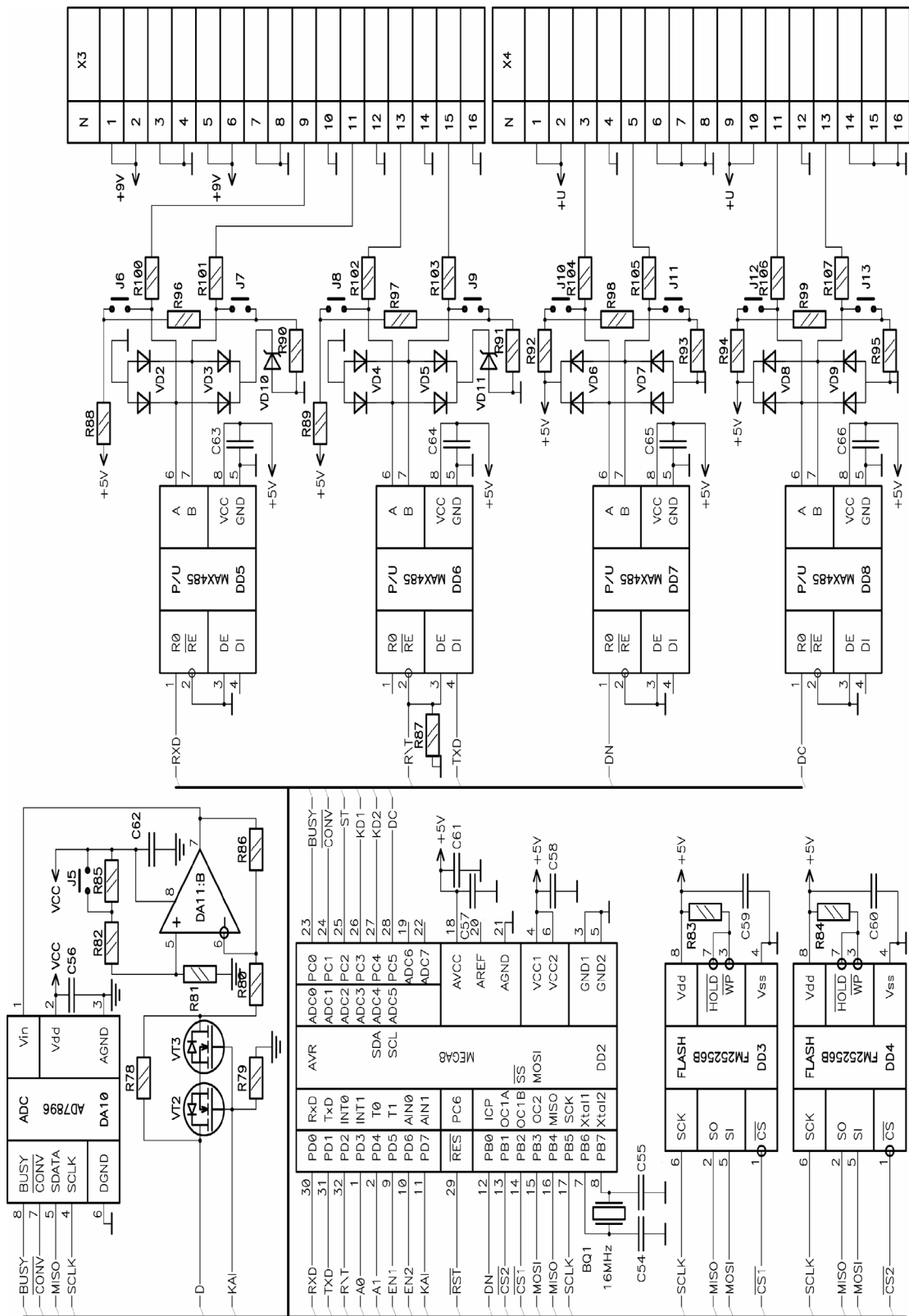


Рисунок В.3 – Схема електрична принципова мікропроцесорного блока УО (закінчення)

*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 3,45 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; email: kivc.vntu@gmail.com.**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.