

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**магістра**

**на тему: «ЗБІР, ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ ВІБРОСИГНАЛУ ЗА  
ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ LABVIEW ДЛЯ  
ДІАГНОСТУВАННЯ РОТОРНИХ МАШИН»**

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: Комп'ютерна механіка

Виконав: студент групи КМ.м-91

Пестун М.О.

Керівник: доц. Савченко Є. М.

Рецензент: Черевко О.А.

Суми – 2020

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 69 с., 27 рис., 21 пос.

*Об'єкт дослідження* – вібраційний стан роторної машини.

*Мета дослідження* – підвищення точності та наочності вібродіагностики роторних машин за допомогою середовища візуального програмування LabVIEW та реалізації в ньому кепстрального аналізу.

*Методи дослідження:* експериментальні – для отримання сигналу з підшипників з різноманітними дефектами; програмування в середовищі LabVIEW – для розробки додатку виконуючого кепстральний аналіз.

В роботі проведено огляд існуючих методів діагностування несправностей роторних машин. Як найменш вивчений і перспективний, був обраний кепстральний аналіз для подальшої перевірки. Вивчено можливості аналізу і обробки вібросигналів у середовищі візуального програмування LabVIEW.

У лабораторних умовах отримано дані для аналізу у вигляді вібросигналів з підшипників кочення з різними видами дефектів. На основі середовища LabVIEW була розроблена програма для кепстральної обробки сигналів і проведені розрахунки на основі даних отриманих експериментальним методом.

Отримані результати неоднозначні: з одного боку, кепстр підтверджує інформацію спектрального аналізу, з іншого боку, воно відображає додаткову інформацію, а її інтерпретація є складним і неоднозначним процесом.

РОТОРНА МАШИНА, АКУСТИЧНИЙ ШУМ, ДІАГНОСТИКА, ВІБРАЦІЯ, ДЕФЕКТ, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ШВИДКЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, ЗВОРОТНЄ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, LABVIEW, КЕПСТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ.

## Зміст

Вступ	5
1 Теоретичні аспекти технічної діагностики роторних машин	8
1.1 Поняття роторних машин та їх діагностика.	8
1.2 Вібродіагностика як основний метод діагностики роторних машин	9
1.3 Параметри механічних коливань	12
1.3.1 Вибір параметрів механічних коливань при вимірах	14
1.3.2 Кількісна оцінка амплітуд	15
1.3.3 Лінійний і логарифмічний масштаби	17
1.4 Система діагностування.	19
1.5 Механізм як об'єкт діагностування	20
1.6 Діагностичні ознаки у вібродіагностиці	22
1.7 Висновки	25
2 Основні методи діагностики вібраційного стану машин	26
2.1 Метод спектрального аналізу.	26
2.1.1 Гармонійний аналіз функцій. Ряди Фур'є	27
2.1.2 Апаратурний спектральний аналіз	28
2.2 Вейвлетний аналіз перетворення сигналів.	30
2.3 Загальні поняття про акустичний шум.	33
2.3.1 Поняття та класифікація акустичного шуму	33
2.3.2 Метод акустико – емісійного контролю.	34
2.4 Кепстральний аналіз.	38
2.5 Висновки	43
3 Аналіз та обробка вібросигналу методом візуального програмування LabVIEW	45
3.1 Середовище візуального програмування LabVIEW	45

3.2 Інструменти середовища LabVIEW для аналізу і обробки сигналів	47
3.3 Завдання і функції розроблюваного додатку	52
3.4 Висновки	53
4 Кепстральне уявлення експериментального вібросигналу в середовищі візуального програмування LabVIEW	55
4.1 Алгоритм розробки програми для кепстрального аналізу вібросигналу	55
4.2 Обробка та аналіз результатів	59
4.3 Висновки	63
Висновки	65
Перелік посилань	68

## ВСТУП

Останнім часом на багатьох промислових підприємствах пильна увага приділяється питанням підвищення надійності експлуатації обладнання та запобігання виникненню аварійних ситуацій. Одним з найбільш відповідальних виробничих об'єктів, що забезпечують безперервність технологічного процесу, є динамічне роторне обладнання.

*Актуальність дослідження.* Застосування сучасних методів вібродіагностики дозволяє отримати попередження про несправності або поломки на ранній стадії розвитку дефекту. Аналіз розвитку в частотних складових спектра вібрації дозволяє визначити момент, коли несправність досягне критичного рівня, і вжити заходів для запобігання простою або аварії. Зміна характерного (базового) спектра вібрації використовується не тільки як попередження про наближення виходу з ладу, а й для визначення наявної несправності.

Будь – яке обладнання, що має рухомі частини, які переміщуються або обертаються, створює механічні коливання, що спричиняють багато дефектів і передчасний знос механізмів. Одним з найбільш поширених видів механічних коливань є вібрація. Набір параметрів вібрації майже повністю характеризує технічний стан працюючого агрегату і дозволяє прогнозувати виникнення несправностей і аварій обладнання.

Вібродіагностикою називається використання набору параметрів вібрації для діагностування стану обладнання. У технічному обслуговуванні роторних машин вібраційний моніторинг та діагностика займають особливе місце, оскільки вони можуть допомогти виявити змін стану машини до початку аварійної ситуації. Це і зумовило повсюдну появу контролю обладнання за вібраційними параметрами і поширення методів вібраційної діагностики для різних класів машин.

Існує велика різноманітність підходів і методів аналізу вібраційного стану машини, але на практиці не можна виділити один універсальний спосіб, що

дозволяє за сигналом точно визначити стан механізму. Через це існує тенденція до пошуку та впровадженню все нових і більш ефективних способів передбачення стану агрегата.

На цей час основним і найбільш інформативним інструментом вібродіагностики є метод спектрального аналізу, тому, говорячи “вібродіагностика машин”, перш за все, мають на увазі аналіз спектрів частот.

Спектральний аналіз – метод обробки сигналів, що дозволяє виявити частотний склад сигналу. На практиці, отриманий спектр для сигналу може бути складним і малоінформативним і явно складно виділити періодичності, пов'язані з певного роду дефектом в механізмі, тому, для читання спектру можна спробувати отримати кепстр сигналу (“спектр логарифма спектру”). В цілому, кепстр сигналу – це швидке перетворення Фур'є від логарифма спектру сигналу.

*Мета дослідження* – підвищення точності та наочності вібродіагностики роторних машин за допомогою візуального середовища програмування LabVIEW та реалізації в ньому кепстрального аналізу.

Для досягнення даної мети в роботі були поставлені такі завдання:

1. Виконати огляд існуючих методів аналізу та обробки вібрації.
2. Вивчити можливості кепстрального аналізу стосовно до дослідження вібросигналів.
3. Розробити алгоритм реалізації кепстрального аналізу вібрації в середовищі візуального програмування LabVIEW.
4. Провести експериментальну перевірку можливостей кепстрального аналізу для оцінки технічного стану об'єкту.

*Об'єкт дослідження* – Вібраційний стан роторної машини.

*Предмет дослідження* – стан підшипників кочення.

*Методи дослідження:* експериментальні – для отримання сигналу з підшипників з різноманітними дефектами; програмування в середовищі LabVIEW – для розробки додатку виконуючого кепстральний аналіз.

У першому розділі викладено теоретичні основи технічної діагностики машин. У другому розділі розглянуті основні методи діагностики вібраційного

стану машини. *Третій* розділ вводить в розділ аналізу та обробки сигналів в середовищі LabVIEW. Заключний *четвертий* розділ описує алгоритм реалізації кепстрального аналізу в LabVIEW.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ РОТОРНИХ МАШИН

## 1.1. Поняття роторних машин та їх діагностика.

Машинами називають системи, призначені для здійснення механічних рухів і силових впливів для виконання необхідних технологічних і транспортних операцій.

Застосування відцентрових машин в даний час носить масовий характер, через що з'являється значний обсяг матеріальних та людських витрат, пов'язаних з підтриманням їх парку у працездатному стані.

Діюча система планово – запобіжних ремонтів (ПЗР) передбачає ремонтне обслуговування насосів відповідно до заздалегідь визначеного графіку, а це призводить до необґрунтованих витрат, зумовлених, з одного боку, невикористаним ресурсом насосних агрегатів при виконанні не потрібних за їх технічного стану ремонтів, а з іншого боку, відсутністю гарантії їх безаварійної роботи в міжремонтний період. Крім того, будь-який ремонт, пов'язаний з розбиранням – збиранням агрегату порушує припрацювання її вузлів, скорочуючи тим самим час безаварійної роботи.

Через це, одним з найбільш дієвих напрямів у вирішенні цих проблем є впровадження методів і засобів технічної діагностики. Їх використання слід розглядати як перехід на якісно новий рівень промислової експлуатації обладнання по його фактичного технічного стану. Завдяки цьому підходу вдасться збільшити міжремонтний період, значно зменшити експлуатаційні витрати, в тому числі за рахунок зниження потреби у запасних частинах і зниження трудомісткості ремонтних робіт.

Системи діагностики, запроваджені за кордоном, дозволяють, наприклад, уникнути вимушеного простою обладнання, збільшити міжремонтний пробіг машин у 2-3 рази, знизити на 30% вартість ремонту та запобігти надзвичайним



подіям. Окупаємість систем діагностики, встановлених наприклад, на насосному обладнанні АЕС – один рік. Тобто, системи діагностики дають не лише безпеку на об'єкті, а ще й несуть прибуток у довготривалій перспективі. Саме це робить розробку таких систем актуальною і необхідною роботою.

Найбільш актуальним розділом технічної діагностики відцентрових насосів, як показано в цій роботі, являється віброакустична діагностика, тому що вона найбільш повно відображає картину явищ, що супроводжують робочі процеси в насосних агрегатах.

Поява складних машин спричинила необхідність спостерігати за їх технічним станом, виявляти та усувати несправності. Розвиток комп'ютерної техніки, що забезпечує автоматизацію процесу зняття, обробки і подальшого аналізу отриманої інформації, дало поштовх до розвитку цієї галузі знань. В результаті чого було розроблено багато різноманітних вимірювальних систем як на базі ЕОМ, так і більш прості, які використовують аналогову і аналог цифрову апаратуру.

## **1.2. Вібродіагностика як основний метод діагностики роторних машин.**

Вібраційна діагностика – це метод діагностування технічних систем і устаткування, заснований на аналізі параметрів вібрації, що створюється працюючим обладнанням або є вторинною вібрацією, яка зумовлена структурою досліджуваного об'єкта. Вібраційна діагностика, як і інші методи технічної діагностики, покликана здійснювати пошук несправностей і оцінювати технічний стан досліджуваного об'єкта. [8]

Метою технічної діагностики є підтримання високого рівня надійності, забезпечення вимог безпеки та ефективності використання агрегатів.

Дана мета досягається шляхом вирішення таких завдань:

- визначення виду технічного стану;
- пошук місця відмови або несправності;

- прогнозування розвитку технічного стану.

Технічна діагностика займається вирішенням всіх питань, пов'язаних з визначенням поточного технічного стану об'єкта та характеру його зміни з плином часу, що необхідно при здійсненні переходу до експлуатації обладнання по його фактичному технічному стану.

Складність цих завдань полягає в тому, що для отримання достовірної картини технічного стану та його змін діагностування об'єкта необхідно проводити в експлуатаційних умовах, не втручаючись в процес його функціонування і не здійснюючи ніяких спеціальних його зупинок для огляду або ремонту з повним або частковим розбиранням, як того вимагає існуюча система ПЗР.

Будь – яке розбирання – збирання агрегату неминує порушує припрацювання його вузлів, не виключає випадкового внесення додаткової погіршення в умови їхньої роботи, отже, може підвищувати ймовірність відмов. Тому основне місце в технічній діагностиці займають методи і засоби безрозбірної діагностики, що ґрунтуються на неконтрольованих на працюючому обладнанні параметрами (ступінь зносу підшипників та інших вузлів, величина дисбалансу, ступінь розцентровки з приводом і т.д.) та контрольованими (температура підшипників, хім. склад мастила і наявність в ній суспензій, величина і характер вібрації, технологічні параметри, наприклад, величина подачі і тиск на вході і виході, якщо розглядається насосний агрегат, і т. д.).

Розрізняють також тестове та функціональне технічне діагностування [2, с.56]. При проведенні тестового на об'єкт подаються спеціально організовані тестові дії та по отриманому відгуку судять про його технічний стан. Тестувати можна в основному лише непрацююче обладнання, а вхідні дії що подаються на нього лише імітують ті, що виникають в ньому у роботі. З цієї причини тестування не може забезпечити необхідної точності діагностики. Функціональне ж технічне діагностування об'єкта здійснюється у процесі застосування його за прямим призначенням, тобто в робочому режимі, і ніякі дії на об'єкт з боку засобів діагностування не подаються, в чому і полягає його явна перевага.

Проте складність здійснення безрозбірної функціональної діагностики полягає в тому, що, по – перше, для кожного виробу можна вказати безліч ознак і параметрів, що характеризують його технічний стан, а по – друге, набір різноманітних контрольованих параметрів вимагає набору відповідних спеціалізованих засобів для їх вимірів, що суттєво знижує ефективність, підвищує вартість і в результаті не дозволяє впроваджувати діагностику до широкої практики експлуатації обладнання в масовому порядку. Дана обставина вимагає пошуку уніфікованих параметрів і ознак, які були б достатніми для проведення необхідного діагностування з певною глибиною пошуку дефекту.

Стосовно до роторних механізмів, якими є і відцентрові насоси, найбільші можливості у вирішенні поставлених вище проблем відкривають методи віброакустичної діагностики, які базуються на використанні параметрів віброакустичних процесів, що супроводжують функціонування будь – яких машин і механізмів. При цьому самі ці процеси розглядаються як поява і поширення у функціонуючій машині акустичних хвиль з частотами від декількох герц до сотень кілогерц, що залежить від джерела та умов їх випромінювання і визначає відповідні, засновані на них методи: вібродіагностики (частоти до 1кГц), акустики (до 20 кГц) та акустичній емісії (до 1 МГц), які об'єднуються загальною назвою як віброакустичні.

Основна цінність віброакустичного сигналу полягає в його універсальності, тому що зміни його параметрів корельовані зі змінами багатьох параметрів технічного стану механізму, викликаними деградацією його вузлів, зміною розмірів деталей, доглядом параметрів регулювань та ін. [3,4,5,6,7,8,9,10].

Широкий частотний і динамічний діапазони, мала інерційність, велика швидкість поширення обумовлюють швидку реакцію віброакустичного сигналу на зміни стану об'єкту. Важлива також достатня простота і доступність перетворення віброакустичного сигналу в електричний і можливість подальшої його обробки за допомогою сучасної мікропроцесорної техніки [11,12,13,14].

Все це дозволяє здійснювати гнучкий підхід до процесу діагностики. Так, щодо більш прості і дешеві методи, що ґрунтуються в основному на використанні

низькочастотних сигналів (до 1 кГц) можуть застосовуватися в системах загальної технічної діагностики, об'єктом яких є механізм в цілому і які зазвичай дозволяють лише локалізувати несправність або вказати дефектний вузол. Деталізація ж і конкретизація виду дефекту, тобто збільшення глибини його пошуку може бути здійснено, наприклад, при розширенні частотного діапазону використовуваних сигналів у звукову і ультразвукову області частот.

У цьому плані особливе місце займає акустична емісія і засновані на ній методи, які отримують все більш широке поширення в останній час. Сама акустична емісія являє собою короткочасні імпульси що генеруються в місці порушення матеріалу, які поширюються в підлягаючій механічним впливам структурі і можуть виявлятися на її поверхні відповідної апаратурою. Імпульсному характеру акустичної емісії відповідає дуже широкий частотний спектр її сигналів, проте на практиці при їх вимірі, аналізі та реєстрації обмежуються частотним діапазоном від 100 кГц до 1 МГц. Можливість застосування акустичної емісії для діагностування механізмів, що мають пари тертя, доведена в цілому ряді робіт [15,16,17]. Тому вона цілком може бути застосована, наприклад, при локальному діагностуванні таких вузлів у насосному агрегаті, як підшипники (кочення і ковзання) та ущільнення, особливо торцеві..

Таким чином, обходячись тільки віброакустичними методами можна вирішити проблему технічного діагностування машини або механізму не тільки в цілому, а й окремих його вузлів.

### **1.3. Параметри механічних коливань.**

Коливання – специфічні рухи або зміни стану систем різної фізичної природи (механіка, фізика, біологія, хімія, економіка та ін.) для яких спостерігається певна повторюваність у часі. В багатьох випадках для опису коливальних процесів використовуються близькі за змістом поняття – вібрація, осциляція. Коливальні процеси характерні для величезної кількості явищ в навколишньому світі та в людському суспільстві. «Світ, в якому ми живемо,

дивно схильний до коливань... Коливаються навіть атоми, з яких ми складаємось». [3, с.58]

Коливальний процес в будь – якій системі виникає лише тоді, коли її будова забезпечує виникнення сил, що намагаються повернути систему до стабільного стану при внесенні зовнішніх збурень. Такі сили називають відновлювальними.

Механічні коливання – це рухи тіла, при яких його положення повторюється. Такі рухи пов'язані з почерговим зміщенням тіла в протилежних напрямках.

Основними параметрами, якими характеризуються механічні коливання, є зміщення, швидкість і прискорення.

Стосовно до вібропроцесів ці параметри зазвичай отримують приставку вібро: віброзміщення, віброшвидкість та віброприскорення:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1.1)$$

де  $A$  – амплітуда коливань;  $\omega$  – кутова швидкість;  $\phi$  – фазовий кут.

Тоді *швидкість*  $v(t)$  коливань, як перша похідна від зміщення по часу буде:

$$v(t) = \dot{x} = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (1.2)$$

а *прискорення*  $a(t)$ , як друга похідна:

$$a(t) = \ddot{x} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (1.3)$$

Іноді використовується також третя похідна за часом, що отримала назву *різкість хвиль*:

$$u(t) = \ddot{x} = -A\omega^3 \cos(\omega t + \phi) \quad (1.4)$$

Форма і частота розглянутих коливань у всіх випадках ідентичні, а головна відмінність полягає в їх взаємному фазовому зсуві: швидкість чи вірніше вектор який зображає її випереджає вектор зміщення на кут  $\pi/2$ , Н. /2, а відповідно вектор прискорення випереджає вектор зсуву на кут  $\pi$ . Видно також, що амплітуди зміщення, швидкості, прискорення і різкості пов'язані між собою через величину  $\omega$  у відповідному ступені.

Враховуючи це, а також те, що зміщення від швидкості, швидкість з прискорення, а прискорення з різкості виходить за допомогою інтегрування, на практиці, нехтуючи фазовими співвідношеннями і спираючись на результати виміру та аналізу коливань з усередненням в часі, значення швидкості механічних коливань при будь – якій частоті можна визначити шляхом ділення значення їх прискорення на цю частоту, а значення зміщення можна аналогічно отримати діленням значення їх прискорення на квадрат відповідної частоти і т. д. (що дає вам змогу обійтися без інтегрування).

На практиці операції взаємного перетворення величин автоматично здійснюються спеціальними електронними схемами – інтеграторами, вбудованими в сучасні вібровимірювальні прилади. За необхідності також застосовуються схеми для зворотного перетворення – диференціювання.

Прискорення механічних коливань для зручності і наочності часто виражається щодо прискорення сили тяжіння  $g$ , хоча така одиниця і не входить в міжнародну систему одиниць.

### 1.3.1. Вибір параметрів механічних коливань при вимірах.

Вибір якогось із параметрів механічних коливань при вимірах залежить від типів досліджуваних машин, амплітудного і частотного діапазонів вимірюваних на них коливань і навіть від звички зайнятих на вимірах фахівців.

При вимірах механічних коливань в широкому частотному діапазоні

вибраний параметр грає важливу роль, зокрема тоді, коли що підлягає дослідженню процес містить багато складових з різними частотами. При цьому вимір зміщення призводить до підкреслення низькочастотних складових, в той час як вимірювання прискорення – високочастотних.

Загальне середньоквадратичне значення швидкості, що вимірюється в частотному діапазоні від 10 до 1000 Гц, найбільш точно відображає небезпеку механічних коливань. Можливим поясненням емпіричного правила є відповідність певного рівня швидкості певному рівню енергії, так що низькочастотні і високочастотні складові досліджуваного процесу мають з точки зору енергії коливань ідентичні значення (вага). Більшість машин що зустрічаються на практиці генерує механічні коливання з плоским і майже лінійним частотним спектром швидкості.

У загальному випадку можна рекомендувати наступне правило: оскільки при частотному аналізі застосування того чи іншого параметра проявляється тільки нахилом споруджуваної спектрограми, то завжди краще застосовувати той параметр механічних коливань, який має менший динамічний діапазон зміни або частотний спектр якого має вид більш плоскою кривою. Це автоматично забезпечує оптимальну експлуатацію вібровимірювальної апаратури, зокрема з точки зору її робочого *динамічного діапазону*, тобто діапазону з межами, рівними найбільшому і найменшому значенню, надійно і точно вимірюваним даною апаратурою. У відповідності з цим правилом перевагу при частотному аналізі зазвичай віддається прискоренню або швидкості механічних коливань.

Так як вимірювання прискорення супроводжується підкресленням високочастотних складових досліджуваного процесу, прискоренню механічних коливань віддається перевага при вимірюванні та аналізі в діапазоні, що перекриває область високих частот.

### 1.3.2. Кількісна оцінка амплітуд механічних коливань.

Для кількісної оцінки амплітуд механічних коливань, що відображає їхню



небезпеку, можна використовувати різні значення. На рисунку 1,1 показано взаємні співвідношення подвійний амплітуди, пікового значення, середнього значення, і середньоквадратичного значення коливань з синусоїдальною формою хвилі і випадкових.

*Подвійна амплітуда*, що відображає повний розмах коливань, є важливим параметром, наприклад, у випадках коли зміщення механічних коливань деталі машини є критичним з точки зору максимально допустимих механічних напружень і зазорів.

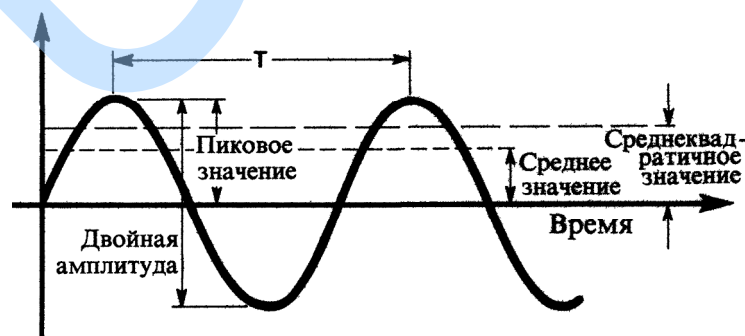
*Пікове значення* ефективне саме для оцінки короточасних механічних ударів і т. д. однак, пікове значення відображає лише максимальне значення досліджуваних коливань і не укладає в собі їх розвиток у часі.

*Середнє значення* (усереднене або абсолютне) відображає розвиток у часі досліджуваних коливань, але його практичне застосування обмежено з огляду на те, що воно не має безпосереднього зв'язку з будь – якою з фізичних величин цих коливань.

Визначається виразом  $\frac{1}{T} \int_0^T |x| dt$ .

(СКЗ) є найважливішим параметром, оскільки в ньому враховується розвиток у часі досліджуваних коливань і воно безпосередньо показує значення, пов'язане з енергією, отже також руйнуючою здатністю цих коливань. Інша назва –

ефективне значення. Визначається виразом  $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$ .



а)



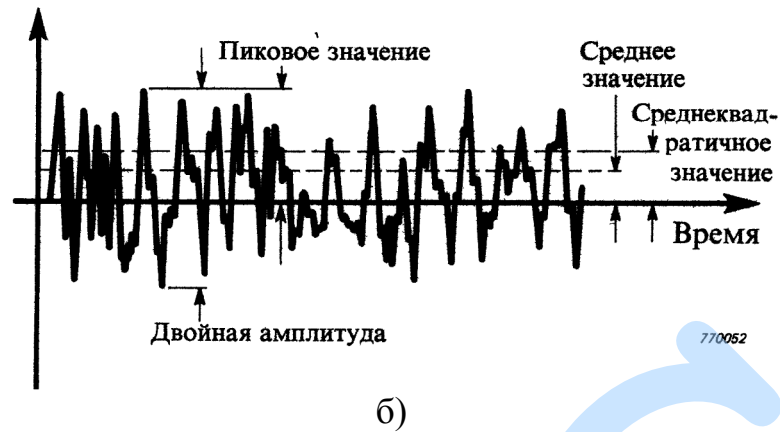


Рисунок 1.1. – Параметри для кількісної оцінки амплітуд механічних хвиль: а) синусоїдальних; б) випадкових

### 1.3.3. Лінійний і логарифмічний масштаби амплітуди і частоти.

З практики відомо, що як великі, так і малі зміни складових частотного спектра механічних коливань можуть вказувати на виникнення несправностей у досліджуваній машині. Отже, необхідно забезпечення однаковою точності в широкому діапазоні амплітуд. У цьому випадку лише логарифмічний масштаб дозволяє з достатньою точністю визначати амплітуди складових у межах досить широкого динамічного діапазону.

Основною перевагою логарифмічних шкал є застосування відносних одиниць при порівнянні будь-яких величин. Найбільш поширеною відносною одиницею що відноситься до логарифмічної шкалою, є децибел (дБ), який визначається ставленням певного  $a$  і опорного  $a_0$  значень відповідної величини механічних коливань:

$$N(\text{дБ}) = 20 \lg \left( \frac{a}{a_0} \right) \quad (1.5)$$

Слід зазначити, що до цих пір не прийняті загальні опорні значення окремих величин механічних коливань. Найчастіше використовувані на практиці

опорні значення механічних величин, що використовуються при обчисленні їх рівнів у дБ, наступні [1]:

- віброприскорення –  $a_0 = 10^{-6} \text{ м/с}^2$ ;
- віброшвидкість –  $v_0 = 10^{-9} \text{ м/с}$ ;
- сила –  $F_0 = 10^{-6} \text{ Н}$ .

Порівняти можливості лінійного і логарифмічного масштабів дозволяє Рисунок 1.2. Коли частотний спектр реєструється в лінійному масштабі амплітуди, як показано в нижній частині малюнка, тільки домінуючі піки знаходяться в межах допустимої точності і не можна простежити відносні зміни яких – небудь інших частотних складових, Крім тих, що мають високі рівні, хоча інші, можливо також важливі складові, проявляються тільки у вигляді невеликих сплесків в нижній частині спектру. Інша річ – логарифмічний масштаб, що може забезпечити перевагу при вимірах та аналізі механічних коливань з метою діагностики технічного стану машин і механізмів, так як ступінь його погіршення краще характеризують саме відносні зміни амплітуд, а не самі їх абсолютні значення.

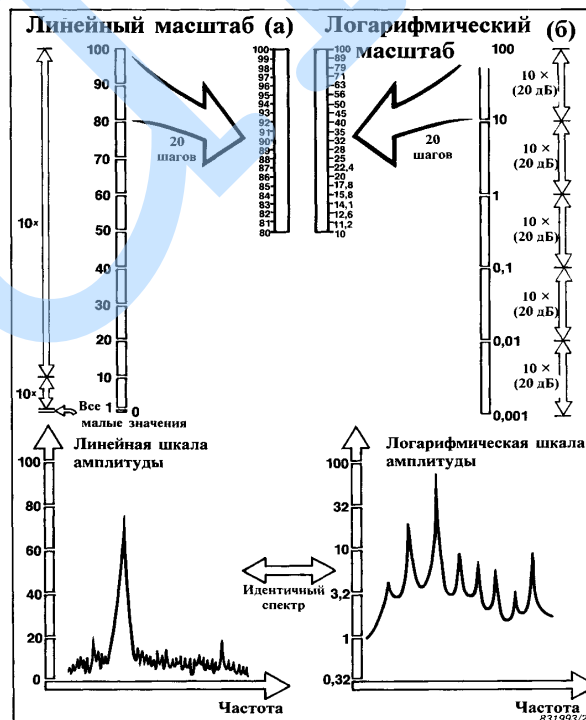


Рисунок 1.2. – Порівняння лінійного і логарифмічного масштабів амплітуд

Слід зауважити, що логарифмічний шкали амплітуди можуть бути проградуєвані не тільки децибелах, але також часто використовуються і звичні механічні одиниці, такі як м/с або мм/с<sup>2</sup>.

В технічній практиці також часто застосовується логарифмічна шкала частоти, що забезпечує розширення області низьких частот і стиснення області високих, отже ідентичне відносне розширення за частотою. При цьому слід зазначити, що висока роздільна здатність досягається якраз в тій частині спектра, де може бути виявлена значна частина несправностей. Логарифмічною шкалою також надається перевага при графічному представленні широкого частотного діапазону на папері з відносно невеликими розмірами.

Однак при проведенні діагностики несправностей, особливо для складного обладнання, корисним може виявитися і лінійний масштаб частоти. Він, зокрема, сприяє відділенню частотних складових і полегшенню діагностики таких несправностей, які характеризуються низкою гармонічно пов'язаних складових. Ілюстрацією цьому служить Рисунок 1.3., де показані характерні проміжки в 120 Гц і 50 Гц між частотними складовими.

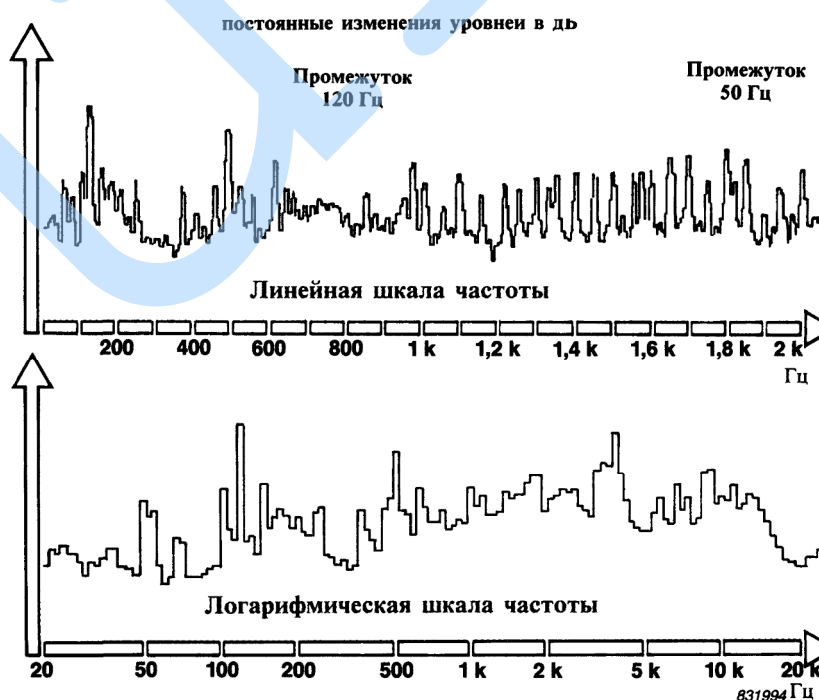


Рисунок 1.3 – Лінійна і логарифмічна шкала частоти

#### 1.4. Система діагностування.

Призначення технічного діагностування полягає в підвищенні надійності об'єктів на етапі експлуатації, а також запобігання виробничому браку на етапі виготовлення. Вимоги, яким повинен задовольняти об'єкт, визначаються відповідною нормативно – технічною документацією.

Здійснення процесу діагностування в загальному випадку передбачає обов'язкову наявність:

- об'єкта діагностування;
- технічних засобів діагностування;
- людини – оператора.

При цьому для забезпечення оператора відповідної діагностичної інформацією необхідна певна організація взаємодії об'єкта і засобів діагностування, що у результаті утворює систему діагностування.

Наприклад, система діагностування стосовно до вібродіагностики включає в себе наступні складові частини, які взаємодіють між собою, що реалізують певні операції в процесі діагностування:

- об'єкт діагностування, поточний технічний стан якого підлягає розпізнаванню;
- підсистему формування діагностичної моделі, що забезпечує взаємозв'язок між технічним станом машини і її вібрацією;
- підсистему вимірювання, яка постачає вихідну для аналізу інформацію, що міститься у вібраційному сигналі;
- підсистему формування діагностичних ознак, перетворюючи отриману при вимірах інформацію у форму, зручну для розпізнавання поточного технічного стану;

- підсистему формування еталонів, що встановлює відповідність між фіксованим технічним станом та набором діагностичних ознак;
- підсистему вирішальних правил, згідно з якими здійснюється розпізнавання технічного стану;
- підсистему розпізнавання поточного стану, в якій на підставі вирішальних правил ставиться діагноз технічного стану;
- підсистему прогнозування, де на основі аналізу трендових характеристик параметрів технічного стану визначається залишковий ресурс.

### **1.5. Механізм як об'єкт діагностування.**

При функціонуванні будь – яких механізмів виникають пружні коливання їх конструкції як побічне явище нормальної передачі динамічних впливів в механічній системі. Причиною динамічних процесів є неврівноважені деталі, що обертаються і коливаються, циклічна зміна жорсткості під час обертання або іншому стаціонарному робочому русі, геометричні недосконалості контактуючих та спряжених деталей і т. д. Тому, коли елементи машини взаємодіють між собою, в конструкції відбувається розсіювання енергії у вигляді механічних коливань. Воно збільшується з віком машини, коли з'являється дисбаланс роторів, порушується центрування валів, внаслідок зносу деталей збільшуються зазори. Усе це призводить до збільшення енергії механічних коливань відтак підвищенню динамічних навантажень. Таким чином, причини і наслідки підсилюють один одного, наближаючи тим самим повний вихід машини з ладу.

При створенні коливань одночасно усіма кінематичними парами механізму утвориться єдине хвильове поле і завдання полягає в розділі сумарного процесу на складові таким чином, щоб можна було оцінити внесок кожної кінематичної пари (вузла механізму). Визначення взаємозв'язку між дефектним вузлом і частотними складовими коливань, що генеруються цим вузлом при роботі механізму, є однією з основних проблем діагностики. Для її вирішення залучаються різні діагностичні моделі.

При побудові моделі розглядаються тільки істотні властивості механізму, винятково важливі для постановки діагнозу. Заміна реальних пристроїв їх ідеалізованими моделями дозволяє відволіктися від їх фізичної природи і за допомогою різних математичних методів формалізувати рішення діагностичних завдань. Як діагностичні моделі розглядають, як правило, моделі, представлені у вигляді системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, феноменологічні моделі, логічні співвідношення, функціональні, структурні, регресивні та інші типи моделей [3,4,5,6].

Вибір того чи іншого типу моделі залежить від цілої низки чинників, таких як умови експлуатації машини, її конструктивне виконання, але в будь – якому випадку модель повинна дозволяти [19]:

- сформулювати умови працездатності, тобто умови розподілу безлічі станів механізму на дві підмножини: працездатне  $M_1$  і непрацездатний  $M_2$ ;
- отримати критерії для оцінки ступеня працездатності машини (тобто розрізнити стан у підмножині  $M_1$ );
- встановити ознаки несправностей що виникли (тобто розрізнити стан в підмножині  $M_2$ ).

### **1.6. Діагностичні ознаки в вібродіагностиці.**

Віброакустичний сигнал містить повну інформацію про взаємодію деталей працюючого механізму. Вся складність діагностики полягає в тому, як отримати з цього сигналу інформацію про стан окремого вузла (деталі) і локалізувати несправність що виникла. Проблема посилюється великим рівнем перешкод при порівняно малій зміні корисного сигналу, що змушує шукати інформативні діагностичні ознаки, чутливі до дефекту, що розвивається і інваріантні до заважаючих факторів. Таким чином, завдання полягає в тому, щоб знайти оптимальний спосіб обробки сигналу, який зводить до мінімуму вплив перешкод і дозволяє однозначно співвіднести отриману характеристику сигналу з видом

шуканого дефекту. Характеристики коливального процесу, чутливі до зміни технічного стану машин, утворюють набір діагностичних ознак.

Раціональний вибір діагностичних ознак, тобто відповідним чином представлених характеристик коливальних процесів, чутливих до зміни технічного стану машин і механізмів, в значній мірі визначає ефективність діагностування. Як відзначається в цілому ряді робіт [3,4,15], діагностичні ознаки повинні задовольняти наступним вимогам:

- бути інваріантними (нечутливими) до змін усередині класу (розглянутого технічного стану) і різко змінюватися при переході від одного класу до одного (від одного стану до іншого);
- стало повторюватися при відтворенні одних і тих же технічних станів;
- володіти високою чутливістю, тобто великою відносною швидкістю його зміни при переході механізму від нормального стану до дефектного;
- зберігати монотонність у діапазоні зміни параметра стану;
- забезпечувати виявлення дефектів на більш ранній стадії їх розвитку;
- забезпечувати необхідну глибину діагнозу, не ускладнюючи процедуру і не збільшуючи вартість діагностики.

В даний час найбільш вживаною на практиці діагностичною ознакою є середньоквадратична величина швидкості коливань ("інтенсивність" або "рівень" вібрації), яка є нормованим параметром. Проте за рівнем віброшвидкості можна судити лише про грубі зміни в технічному стані машини. Локалізація несправності яка розвивається, визначення ступеня її розвитку та прогноз на майбутнє практично неможливі. Тому все частіше звертаються до пошуку більш інформативних ознак, заснованих на більш глибоких дослідженнях структури вібрації і зв'язку його з кінематикою і динамікою механізму.

Вибір інформативних діагностичних ознак тісно пов'язаний з характером хвилеутворення в механізмі та з структурою вібраційного сигналу. Як зазначалося, вибору моделі формування вібросигналу в вібродіагностиці відводиться важлива роль. Стосовно до роторних машин, зокрема, найбільший розвиток отримали детерміновані моделі, в яких віброакустичний сигнал



представляється як полігармонічний процес, гармонійні складові якого фізично обумовлені і частота їх кратна до основної робочої частоті машини (частоті обертання ротора, наприклад). Інформативними діагностичними ознаками тут є частота, амплітуда і фаза гармонійних складових. В [1] пропонується загальний порядок виявлення інформативних діагностичних ознак:

- на підставі статистики відмов складається перелік несправностей, що підлягають розпізнаванню;
- кожному виду відмов ставиться у відповідність структурний параметр;
- у процесі навчання системи діагностики на однофакторних експериментах встановлюється відповідність між відмовою і ознакою.

При вібродіагностиці для виявлення інформативних діагностичних ознак рекомендується наступна процедура:

- отримання спектральних характеристик коливального процесу при нормальному і дефектному функціонуванні механізму;
- виявлення частотного діапазону, де зазначаються найбільші зміни спектральних характеристик, і фіксація виду цих змін (зміна амплітуд дискретних складових, перерозподіл енергії за частот, відносне зростання шумової компоненти, поява гармонік або субгармонік основних частот збудження, поява або збільшення амплітуд модуляційних або комбінаційних частот та ін.);
- побудова математичної моделі формування вібросигналу при появі дефекту;
- вибір системи попередньої обробки вібрації (фільтрація, детектування, стробування і т. п.) з метою підвищення його інформативності та усунення неінваріантності;
- складання відповідно до зміни спектру вібросигналу переліку його характеристик, найбільш чутливих до тих змін..

Для забезпечення інваріантності діагностичних ознак в пропонується використовувати безрозмірні параметри вібросигналу, звані амплітудними



дискримінантами. Так, якщо вібросигнал вимірюється як функція часу  $x(t)$  з одновимірною щільністю ймовірностей миттєвих значень  $p(x)$ , то вимірювану амплітуду вібропроцесу можна представити як момент  $k$  – го порядку:

$$\bar{x}_k = \left[ (x)^k \int p(x) dx \right]^{\frac{1}{k}} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (x(t))^k dt \right]^{\frac{1}{k}}, \quad (1.6)$$

де  $\bar{x}_k$  - середнє значення амплітуди процесу як корінь  $k$  - го порядку з  $k$  - го моменту.

### 1.7 Висновки

Здебільшого величина загального рівня вібрації визначає лише загальну віброактивність усіх головних вузлів контрольованої машини – якість центрування, стан опорної системи, ступінь балансування роторів і т.п. Деякі дефекти, навіть розвинені, не завжди впливають на збільшення загального рівня вібрації, і в тих випадках, коли їх частоти недоліків потрапляють в контрольований діапазон. Випадками дефектів для відцентрових насосів є перекид і зачіпання бандажа, дефекти підшипників кочення, руйнування ущільнень та ін. Для уникання аварійних виходів з ладу і вчасного виявлення цих та інших видів несправностей поряд з контролем загального рівня необхідний аналіз цілого ряду спеціальних вимірів, та, перш за все, спектрів. Конкретно спектральний аналіз, дозволяє розібратися в причинах виникнення вібрації і підібрати оптимальне рішення для їх усунення, на відміну від контролю за загальним рівнем.

Найбільш прийнятною для оцінки технічного стану роторних машин є віброакустична діагностика. Вона якнайповніше відтворює природу явищ, що проводжують протікання в них робочих процесів, і використовує в ролі джерела інформації вібросигнал, що володіє великою інформаційною ємністю, має малу інерційність, широкий частотний та динамічний діапазони, велику швидкість поширення. Така природа вібросигналу дозволяє оперативно, а при використанні

ПК і в реальному масштабі часу, оцінювати технічний стан об'єкта діагностування.

Процес діагностування слідує процедурі оцінки параметрів вібросигналів, що показують зміну технічного стану механізму. До того ж завдання полягає у відстеженні оптимального способу обробки сигналу, що зводить до мінімуму вплив перешкод та який дозволяє однозначно співвіднести отриману характеристику сигналу з видом шуканого дефекту, інакше кажучи необхідно знайти правильний вибір інформативних діагностичних ознак.

## 2 ОСНОВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ МАШИНИ

### 2.1. Метод спектрального аналізу.

Вибір методу вібродіагностики залежить від структурного, функціонального і вібраційного станів об'єкта.

Структурний стан характеризується сукупністю властивостей конструкції: геометрією елементів і взаємозв'язками між ними. Цей стан об'єкта відображається в основному періодичними коливальними процесами; адекватним методом фізичної природи таких процесів є метод слідкуючого спектрального аналізу.

По порядку гармонік вібрації можна ідентифікувати джерела: амплітуди цих гармонік характеризують розподіл енергії, пов'язаний зі станом об'єкта. При розвитку дефекту енергія коливань збільшується..

У роторних і зубчастих механізмах структурний стан відображається ударними процесами. В цьому випадку адекватним процесом буде метод когерентного накопичення, при якому виділяють ударні імпульси від кожного зуба діагностованої шестерні. Частота прямування імпульсів визначає джерело, відмінність рівнів причину, а абсолютне значення рівнів імпульсів – ступінь несправності.

Спектральний аналіз – це метод обробки сигналів, що дозволяє виявити частотний склад сигналу. Виявлення підвищених амплітуд вібрації на частотах, що збігаються з частотами можливих пошкоджень елементів, резонансних частотах деталей, на частотах протікання робочого процесу допомагає виявити та ідентифікувати несправність на ранніх стадіях зародження та розвитку.

### 2.1.1 Гармонійний аналіз функцій. Ряди Фур'є.

У загальному випадку періодичні функції з періодом  $T$  можуть бути представлені у вигляді ряду Фур'є:

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(k\omega t) \quad (2.1)$$

Цьому розкладу відповідає подання періодичних коливань у вигляді суми гармонійних коливань з частотами, кратними основній частоті:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

Для представлення функції  $u(t)$  в цій формі вона повинна задовольняти умовам Діріхле, тобто бути обмеженою та мати кінцеву кількість максимумів, мінімумів і точок розриву першого роду на будь-якому кінцевому інтервалі.

Коефіцієнти  $a_k, b_k$  ( $k \in \{0; N\}$ ) називаються коефіцієнтами Фур'є. Коефіцієнт  $\frac{a_0}{2}$  характеризує середнє значення величини яка коливається, коефіцієнти  $a_1, b_1$  – компоненту руху з основною частотою  $\omega$ . Ця компонента називається першою (основною) гармонікою коливального руху. Компоненти руху з частотами  $k\omega$  ( $k > 1$ ) називаються вищими гармоніками, а число  $k$  – номером гармоніки. Ряд Фур'є для коливального процесу може бути як нескінченним, так і скінченним. Сукупність частот гармонійних складових називається частотним спектром даного періодичного процесу. Кожній частоті відповідає амплітуда  $A_k$  і початкова фаза  $\varphi_k$ :

$$A_k = a_k + b_k \quad (2.3)$$

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{b_k}{a_k}\right) \quad (2.4)$$

Сукупність амплітуд і початкових фаз, що характеризують гармонійні коливання, називається амплітудним і фазовим спектром.

Визначення спектру частот і коефіцієнтів Фур'є за заданими періодичними функціями називається спектральним аналізом. Коефіцієнти Фур'є пов'язані з функцією  $u(t)$  наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} a_k = \frac{1}{2} \int_0^T u(t) \cos(k\omega t) dt \\ b_k = \frac{1}{2} \int_0^T u(t) \sin(k\omega t) dt \end{cases} \quad (2.5)$$

Якщо функція задана аналітично, то спектральний аналіз може бути проведений безпосередньо по цих формулах. Якщо ж інформація про коливальний процес задана у графічній або табличній формі, то у вигляді електричного сигналу, магнітозаписи і т.д., то для спектрального аналізу застосовуються графічні, чисельні і апаратурні методи.

### 2.1.2 Апаратурний спектральний аналіз.

Апаратурний спектральний аналіз заснований на автоматичному розкладанні коливального процесу на гармонійні складові за допомогою спеціальних приладів – аналізаторів спектру. Серед різноманіття застосовуваних для цього технічних засобів слід виділити дві основні групи:

- 1) апаратура, дія якої заснована на використанні принципу фільтрації;
- 2) апаратура, що безпосередньо реалізує перетворення Фур'є.

Апаратура другої групи будується на базі універсальних або спеціалізованих цифрових обчислювальних машин, що використовують алгоритми чисельного розрахунку коефіцієнтів ряду Фур'є.

В аналізаторі паралельного дії (рисунок 2.1) досліджуваний сигнал після підсилювача 1 одночасно подається на групу смугових фільтрів 2, кожен з яких налаштований на окрему частоту. На виході кожного фільтра присутні тільки ті спектральні складові процесу, які потрапляють в смугу його пропускання. Їх

інтенсивність можна виміряти окремо в кожному з фільтрів, отримавши, таким чином, спектр. Необхідну роздільну здатність приладу отримують використанням достатньої кількості фільтрів, які мають достатньо вузьку смугу пропускання.

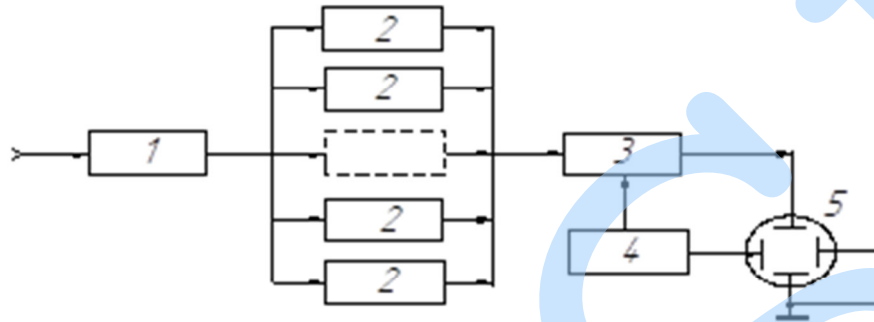


Рисунок 2.1. – Аналізатор спектра паралельного дії.

Як правило, до складу аналізаторів спектру включаються реєструючі прилади з графопобудовниками або електронно – променевими трубками. Горизонтальне відхилення пера або променя пов'язано з частотою налаштування фільтра приладу, а вертикальне – з напругою на виході фільтру. В аналізаторі паралельного дії для цього застосовуються комутатори (перемикачі) фільтрів 3. Блок управління 4 автоматично перемикає фільтри і одночасно переміщує луч електронно – променевої трубки 5, так що на горизонтальній осі частот кожному фільтру відповідає свій "стовпчик", висота якого в певному масштабі відповідає амплітуді складових коливань, пропущених фільтром. Таким чином, на екрані отримують зображення амплітудного спектру в зручній легкою до читання формі.

В аналізаторі послідовного дії з безпосередньою фільтрацією (рисунок 2.2) використовується один фільтр 2, який перебудовується в межах необхідного діапазону частот блоком управління 3, який одночасно формує пропорційне частоті налаштування фільтра напруження для горизонтального відхилення пера графопобудовника 5. Вертикальне відхилення досягається при допомоги

амплітудного детектора 4, напруження, на виході якого визначається амплітудою коливань, що пройшли через фільтр.

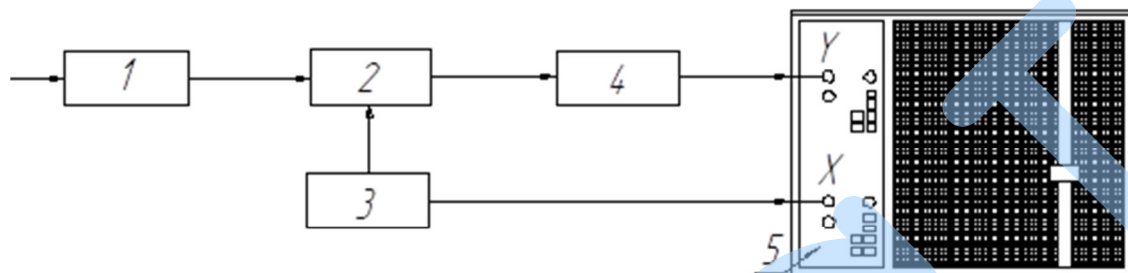


Рисунок 2.2 – Аналізатор послідовної дії

## 2.2. Вейвлетний аналіз перетворення сигналів.

Вейвлети - це функції, які можна використовувати для розкладання сигналів. Подібно до того, як перетворення Фур'є розкладає сигнал на сімейство складних синусоїд, вейвлет-перетворення розкладає сигнал на сімейство вейвлетів. На відміну від синусоїд, які бувають симетричними, гладкими та регулярними, вейвлети можуть бути як симетричними, так і асиметричними, різкими або гладкими, регулярними або неправильними. На наступному рисунку порівнюється синусоїда з вейвлетом.

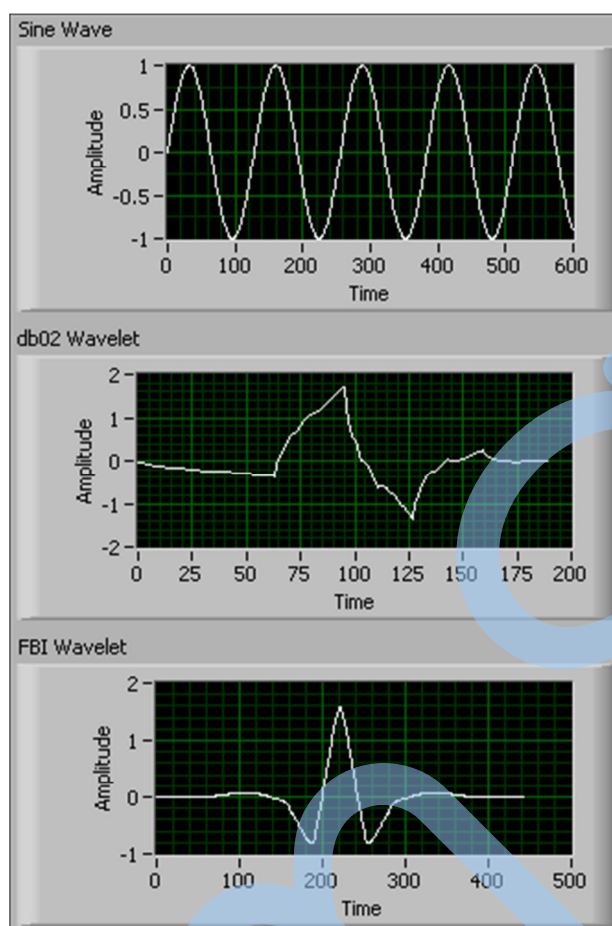


Рисунок 2.3 а) – Приклад вейвлетного перетворення

Вейвлет-перетворення обчислює внутрішні добутки сигналу з сімейством вейвлетів. Інструменти вейвлет-перетворення класифікуються на інструменти безперервного вейвлету та дискретні інструменти вейвлету. Зазвичай для аналізу сигналів ви використовуєте інструменти безперервного вейвлету, такі як аналіз самоподібності та аналіз частоти часу. Ви використовуєте дискретні інструменти вейвлету як для аналізу сигналів, так і для обробки сигналів, таких як зменшення шуму, стиснення даних, виявлення піків тощо.

На відміну від синусоїд, вейвлети локалізовані як у часовій, так і в частотній областях, тому обробка вейвлет-сигналів підходить для нестационарних сигналів, спектральний вміст яких змінюється з часом. Адаптивна частотно-часова роздільна здатність обробки вейвлет-сигналів дозволяє виконувати аналіз мультирезольції нестационарних сигналів. Властивості вейвлетів та гнучкість їх вибору роблять обробку вейвлет-сигналів корисним інструментом для технічної діагностики.



Вейвлет-обробка сигналів відрізняється від інших методів обробки сигналів завдяки унікальним властивостям вейвлетів. Наприклад, вейвлети неправильної форми і кінцевої довжини. Вейвлет-обробка сигналів може представляти сигнали роздільно, фіксувати перехідні особливості сигналів і дозволяти аналіз сигналів з різною роздільною здатністю.

Вейвлети локалізовані як у часовій, так і в частотній областях, оскільки вейвлети мають обмежену тривалість часу та пропускну здатність частоти. Вейвлет-перетворення може представляти сигнал з кількома коефіцієнтами через властивість локалізації вейвлетів. На наступному малюнку показано форму сигналу доплерівського сигналу та коефіцієнти дискретного вейвлет-перетворення (DWT) сигналу Доплера.

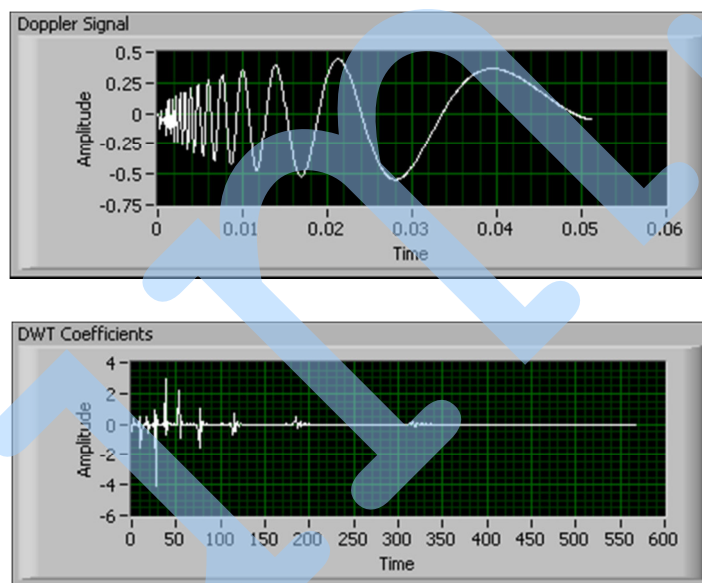


Рисунок 2.3 б) – Приклад вейвлетного перетворення

На попередньому малюнку більшість коефіцієнтів DWT дорівнюють нулю, що вказує на те, що вейвлет-перетворення є корисним методом для представлення сигналів коротко і компактно. Тому ви зазвичай використовуєте DWT у деяких програмах стиснення сигналу.

На рисунку 2.3 в) приведений приклад графічного відображення вейвлетної поверхні реального фізичного процесу [4]. Вигляд поверхні визначає зміни в часі спектральних компонент різного масштабу та називається частотно–часовим

спектром. Поверхня зображується на рисунках, як правило, у вигляді ізоліній або умовними кольорами. Для розширення діапазону масштабів може застосовуватися логарифмічна шкала.

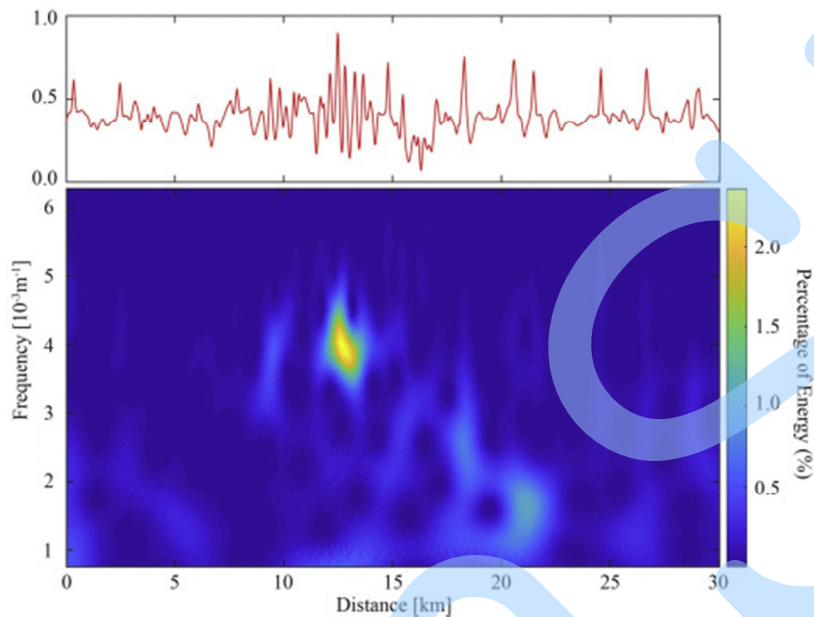


Рисунок 2.3 в) – Приклад вейвлетного перетворення

## 2.3. Загальні поняття про акустичний шум.

### 2.3.1. Поняття та класифікація акустичного шуму.

Акустичний шум – це коливання повітряного середовища в діапазоні приблизно від 16 Гц до 20 кГц.

Акустична емісія – процес виникнення пружних хвиль у результаті викиду енергії з локальних джерел в структурі матеріалу. основними джерелами емісії у металах є рух дислокацій, супроводжуючий пластичну деформацію або виникнення і зростання тріщин у структурі під напруженням. Іншими джерелами акустичної емісії є: плавлення, кристалізація, теплові напруги, охолодження, зростання напруження та інші фактори, що викликають рух дислокацій. Залежно від походження розрізняють шум:

- механічний, що виникає при русі, зіткненні, терті деталей машин і обладнання;

– аеро – і гідродинамічний, що виникають при русі газу, пари, рідини в результаті пульсацій тиску через турбулентного перемішування потоків, що рухаються з різними швидкостями в вільних струменях або через турбулізації потоку біля кордонів обтічного тіла;

– термічний, що виникає при турбулізації потоку, при горінні або миттєвому зміні тепла, що приводить до миттєвого підвищення тиску (вибух).

Виробничі шуми класифікуються:

– із спектрального складу (низькі частоти до 300 Гц, середні від 300 Гц до 800 Гц і високі вище 800 Гц);

– за характером спектра (широкосмугові і тональні);

– за часовими характеристиками (стабільні, переривчасті і імпульсні).

Залежно від середовища, в якій поширюється шум, розрізняють корпусний (структурний) і повітряний шум.

### 2.3.2. Метод акустико – емісійного контролю.

Метод акустико–емісійного контролю заснований на реєстрації та подальшою обробці акустичних сигналів що відносяться до АЕ. Метод АЕ контролю реалізується в процесі активного навантаження контрольованого об'єкта. Для проведення АЕ діагностики до об'єкта контролю мають бути прикладені статичні або динамічні навантаження підвищенням тиску при гідравлічних або пневматичних випробуваннях, або повинні бути створені напруження механічним навантаженням об'єкта.

Апаратура акустичної емісії повинна забезпечити акустичне охоплення – всього об'єкту контролю, накопичення даних протягом випробувань, а так само аналіз даних у режимі реального часу. Сучасна АЕ апаратура, побудована із застосуванням цифрової обробки сигналу в режимі реального часу, дозволяє виділяти АЕ сигнал з шумових перешкод, визначати координати джерел, класифікувати виявлені джерела, і зберігати результат для подальшої обробки.

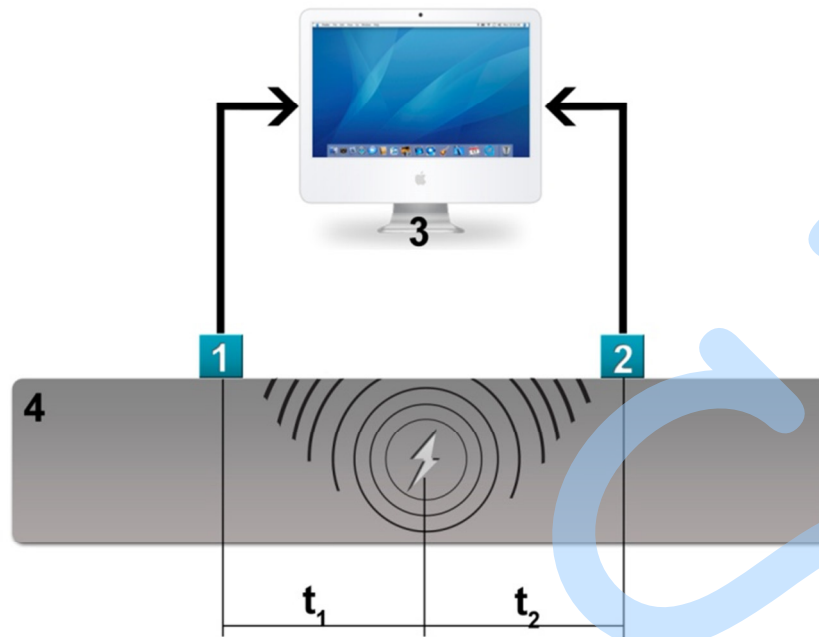


Рисунок 2.4 – Метод акустичної емісії:

- 1 – перетворювач АЕ (приймач 1); 2 – перетворювач АЕ (приймач 2);
- 3 – центральний блок збору і обробки на базі комп'ютера;
- 4 – об'єкт контролю;  $t_1$  – час приходу сигналу на перший приймач;
- $t_2$  – час приходу сигналу на другий приймач

За зареєстрованому часу приходу сигналу  $t_i$  на  $i$  – й приймач (датчик) системою визначається різниця часу приходу  $T(T = t_2 - t_1)$  на рознесені приймачі. Потім за відомою швидкістю звуку в матеріалі і відомим координатами приймачів програмою обчислюються координати джерела (дефекту). Схеми розташування датчиків можуть бути різноманітними.

Коливання поширюються від джерела випромінювання до датчика (датчикам), де вони перетворюються в електричні сигнали. АЕ прилади реєструють ці сигнали і відображають дані на екрані у вигляді осцилограм, локацій, цифрових індикацій, на основі яких оператор може оцінити стан і поведінку структури матеріалу під напруженням, виявити і визначити місцезнаходження дефектів.

Метод АЕ контролю заснований на виявленні, реєстрації та аналізі пружних коливань, що виникають за пластичної деформації твердих середовищ,

розвитку дефектів (тріщини, мікротріщини, розшарування, корозія тощо), тертя, витоки (проходження рідких і газоподібних середовищ через наскрізні дефекти).

Галузі застосування:

- оцінка цілісності структур;
- лабораторні дослідження;
- випробування основ наливних резервуарів;
- перевірка якості виробництва;
- виявлення корозії;
- випробування автомобільних і залізничних цистерн;
- випробування судин з обмеженим доступом до поверхні (теплоізоляції, кріогенних і т. п.);
- труби і газові балони високого тиску;
- випробування трансформаторів;
- випробування трубопроводів;
- випробування реактивних двигунів.
- моніторинг споруд і промислових об'єктів;
- оцінка залишкового ресурсу;

АЕ аналіз – суттєва допомога при випробуванні матеріалів та вивченні деформації, руйнування та корозії. Він дає негайну відповідь поведінки матеріалу під напруженням, пов'язаним з деформацією і руйнуванням матеріалу. Акустична Емісія використовується також для того, щоб контролювати хімічні реакції, включаючи процес корозії і зміни фази агрегатного стану.

Головна перевага АЕ контролю – він не вимагає доступу до всієї області експертизи. Таким чином, вартість випробування – значно менше, ніж контроль звичайними методами контролю. Виявлені області джерел АЕ можуть бути обстежені, використовуючи звичайні методи.

У разі контролю теплоізольованого об'єкта, необхідно знімати ізоляцію лише в невеликих зонах для установки датчиків, це знижує вартість робіт. У випадках об'єктів з високими температурами, використовуються хвилеводи, щоб вивести АЕ сигнал від гарячої поверхні до місця установки датчика. Нарешті, у

великих криогенних судах, постійні датчики встановлюють під ізоляцією для періодичного контролю.

Фактичне АЕ випробування вимагає найменший час контролю. Немає ніякої порівнянної техніки, яка може забезпечити повний обсяг контролю за цей час.

Використання АЕ контролю дає значне скорочення витрат на застій обладнання при його контролі. В деяких випадках обстеження обладнання можна проводити, не виводячи його з робочого циклу.

Безперервна реєстрація АЕ сигналів в процесі роботи об'єктів контролю. Результати контролю записуються і використовуються для поточного аналізу стану об'єкту. При різкій зміні параметрів АЕ, система негайно переходить до запрограмованим діям. Результати моніторингу зберігаються і можуть бути використані для накопичення статистичних даних.

Якщо використано є більш ніж один датчик, то може бути визначено розташування АЕ джерела, і таким чином знайдена дефектна область. Визначення місцеположення джерела АЕ базується на принципах поширення хвилі в межах матеріалів. Воно може бути знайдено за різницею часу приходу сигналу на кожен датчик. Лінійне місце розташування використовується на трубопроводах і довгих газових балонах, плоске (2 – вимірне) місце розташування для судин і плоскостінних об'єктів, в той час як 3 – вимірне місце розташування використовується для трансформаторів і об'ємних структур.

У порівнянні зі звичайними методами контролю переваги АЕ технології в наступному:

- раннє і швидке виявлення дефектів, можливість визначення залишкового ресурсу;
- висока чутливість до зростаючих дефектів;
- невисока вартість випробувань;
- контроль в режимі реального часу;
- можливість застосування штучного інтелекту і технологічних програм.

- мінімізація часу простою устаткування для обстеження, низька потреба часу на контроль;
- незначне пошкодження ізоляції при обстеженні;
- визначення місцеположення областей, що містять дефекти. Тільки критичні дефекти забезпечують активні джерела акустичної емісії;

Побудова систем аналізу що використовують досвід, набутий при проведенні величезної кількості випробувань по всьому світу.

#### 2.4. Кепстральний аналіз.

Кепстральний аналіз являє собою зворотне перетворення логарифма спектру сигналу, тобто кепстр сигналу – це спектр логарифма спектру.

На відміну від спектрального аналізу, де спостерігається залежність амплітуди від частоти, тут по осі  $X$  відкладається особлива величина – кепстральний час або сачтота.

Сачтота є нестандартною часовою величиною. В той час як спектр показує періодичності у часовій області сигналу, кепстр дозволяє знаходити гармоніки у спектрі. На рисунку 2.5 показаний взаємозв'язок між спектром і кепстром сигналу.



Рисунок 2.5 – Взаємозв'язок між спектром і кепстром сигналу

На рисунку 2.6 представлені приклади спектрального і кепстрального аналізів вібросигналу з підшипника кочення з різними дефектами.

Так спектр сигналу підшипника з дефектом зовнішньої обойми має пік на частоті 90Гц. Спектр сигналу підшипника з дефектом внутрішньої обойми



показує періодичність на частоті 120Гц. Також на спектрі сигналу робочого підшипника є пік на частоті 90Гц. Іншими словами, не завжди за спектром сигналу можна точно сказати про стан досліджуваного об'єкта.

Кепстральний аналіз вважається ефективним методом для пошуку гармонік в спектрі сигналу. Кепстр сигналу підшипника з дефектом зовнішньої обойми показує явний пік на 11,2мс, що відповідає гармоніці на частоті 90Гц. Кепстр сигналу підшипника з дефектом внутрішньої обойми відображає періодичність на частоті 8,3мс (120 Гц). Кепстр сигналу робочого підшипника не має явно виражених піків.

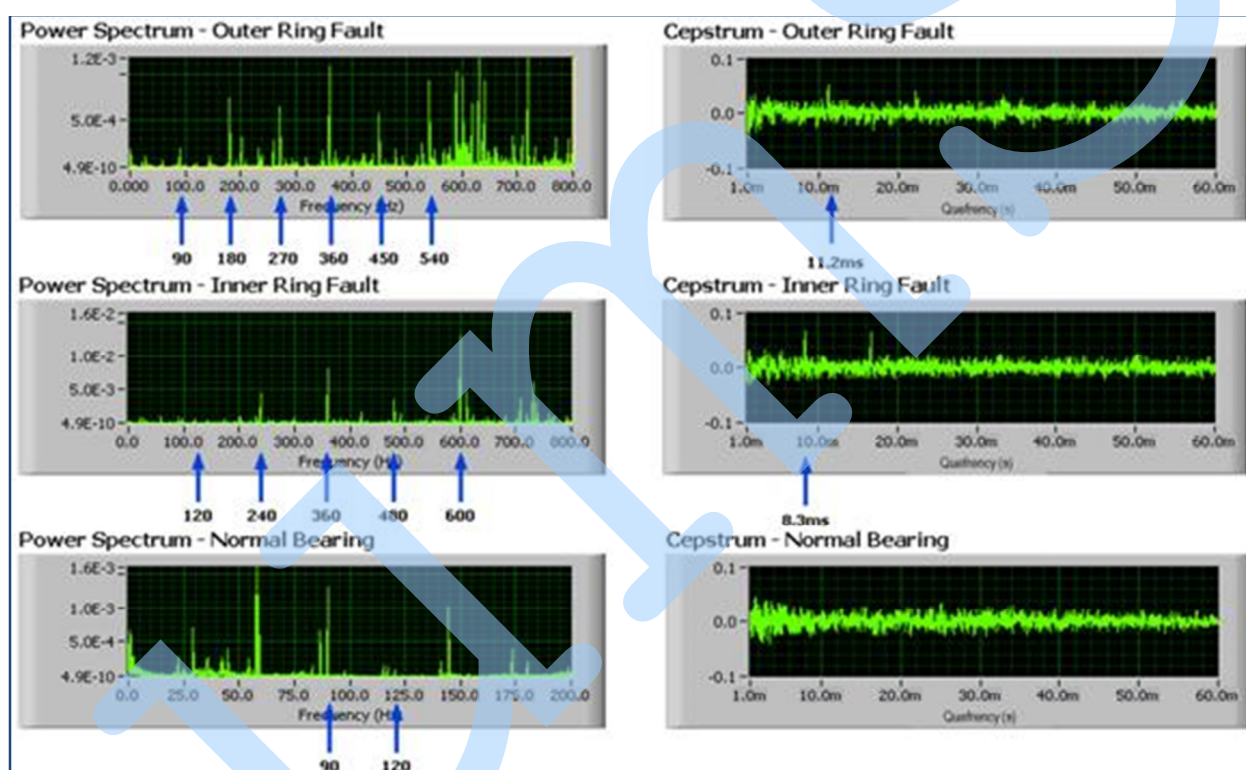


Рисунок 2.6 – Спектр і кепстр сигналу підшипника з дефектом зовнішньої, внутрішньої обойми, робочого підшипника

Ідея такого досить незвичайного методу аналізу сигналу народилася з очевидних переваг традиційного спектрального сигналу. В природі не часто зустрінеш вібрації синусоїдального характеру, в багатьох випадках і вигляд спектру вимагає тривалого і вдумливого аналізу. Було запропоновано замінити у



спектрі вісь частоти на вісь часу, тобто уявити, що даний спектр є просто сигналом.

Тоді, визначивши спектр цього "сигналу" (це і є кепстр), можна буде визначити невидимі явно періодичності в цьому "сигналі". А присутні у вигляді вихідного спектру періодичності є не що інше, як гармонійні ряди.

Таким чином, з'явиться можливість представити вихідну спектральну інформацію ще більш компактно, коли кожен гармонійний ряд вихідного спектру представлений всього однією (в ідеалі) складовою в кепстрі.

Кепстральний аналіз застосовують для сигналів, що представляють собою згортку двох функцій часу, причому таких, що після перетворення їх у спектр вони утворюють на осі  $q$  імпульси що не перекриваються.

На сьогоднішній день прийнято вважати, що кепстр – це спектр логарифма спектру вихідного сигналу:

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln[S(\omega)]^2 e^{i\omega q} d\omega \quad (2.6)$$

де:  $S(\omega)$  – спектральна щільність сигналу;  
 $q$  – спектральний час.

Для більшої наочності можна конкретизувати представлений вихідний спектр (Рисунок 2.5). Нехай цей спектр отриманий в діапазоні від 0 до 80Гц з кроком аналізу за частотою 1Гц, тобто складається з 80 – ти спектральних складових. основні дискретні складові в спектрі належать двом частотним рядам: гармоніки частоти 10Гц (ряд r1) і гармоніки частоти 18Гц (ряд r2).

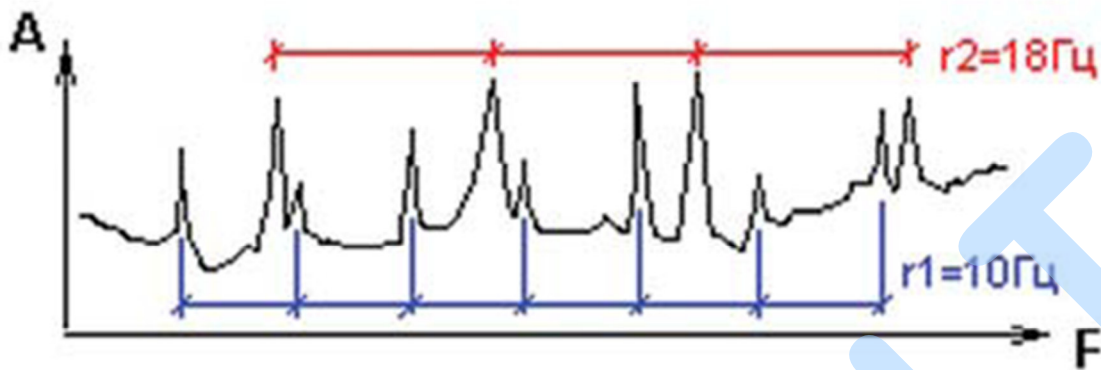


Рисунок 2.5 – Вихідний спектр

Отже, нехай, в цифровому вигляді зберігаються дані вихідного спектру – 80 значень на частотах від 1 до 80Гц. Для початку потрібно замінити вісь частоти на вісь часу. Для цього необхідно прочитати ці 80 значень в якомусь темпі і ввести в аналізатор для обчислення спектру. Тут починаються нюанси кепстрального аналізу:

- на відміну від звичайного спектрального аналізу тут відсутнє поняття усереднення, усереднювати тут нема чого, дані вводяться одноразово;
- скільки робити відліків при введенні даних? очевидно, 80. Якщо менше, то втрачається частина інформації, якщо більше – дані будуть повторятися;
- як рахувати дані, справа наліво або ліворуч праворуч? Ніякого значення не має. Абсолютно очевидно, що напрямок вводу ніяк не відіб'ється на тих періодичностях, які необхідно виявити в сигналі;
- яка повинна бути частота опитування? Виявляється, в даному випадку це теж ніякого значення не має. Чим цей спектральний аналіз суттєво відрізняється від звичайного?

Зовнішній вигляд кепстру ніяк не залежить від частоти опитування, змінюватися будуть тільки значення за шкалою частоти. Для наочності у цьому прикладі приймається, що введення даних для обчислення кепстру робиться з частотою 1Гц. Це означає, що і команда займе 80 секунд, кепстр буде обчислений у діапазоні частот від 0 до 0,5Гц, буде складатися з 40 спектральних складових з

кроком за частотою 0.0125Гц. Логічно очікувати, що в кепстрі виділяться дві частотні складові, що характеризують ряди 10Гц і 18Гц вихідного спектру.

Дійсно спостерігаються дві складові на частотах 0.055Гц и 0.1Гц.

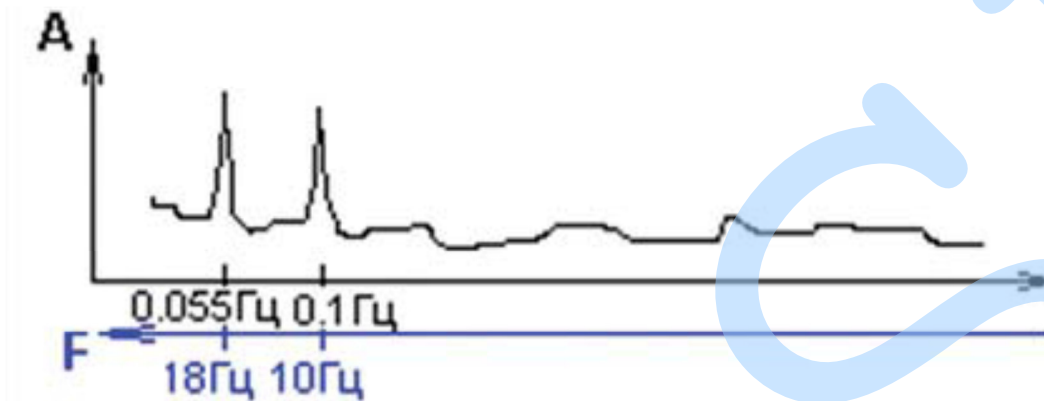


Рисунок 2.6 – Спектр вихідного спектру (кепстр)

Якщо проаналізувати ті параметри введення даних, про які говорилося вище, то виявиться, що частота 0.055Гц відповідає періодичності у початковому спектрі 18Гц, а частота 0,1Гц відповідає періодичності 10Гц.

Загалом, якщо подивитися ще раз вихідний рисунок і замінити подумки літеру F на осі абсцис на літеру t, – це і є вихідний "сигнал" для кепстрального аналізу. Хіба цей сигнал хоч віддалено нагадує за своїм виглядом суму двох синусоїд. Скоріше це схоже на сигнал з якогось індукційного датчика оборотів, коли вал обертається нестабільно. А адже реальні спектри можуть виглядати набагато "страшніше", що дедалі більш вузькосмуговий аналіз робився початково, тим більш гострими будуть піки і тим їх буде більше в цьому "сигналі". ось тут і необхідно звернутися до логарифмування вихідного спектру. По суті тут ця процедура спрямована на те, щоб якимось згладити вид вихідного спектру та, відповідно, зменшити кількість паразитних складових у кепстрі.

Важливо розуміти ті відмінності, які є між частотними складовими у спектрі і частотними складовими у спектрі, званому кепстром. У першому випадку будь – яка частотна складова має фізичний сенс, сигнал з такою частотою дійсно присутній у вихідному сигналі у часовій області. У другому ж

випадку, в кепстрі, присутність гармонік може зовсім не означати, що у вихідному спектрі існують відповідні періодичності, а тільки те, якою мірою видискретних складових у вихідному спектрі більш або менш гостровершинний.

## 2.5 Висновки

У цій главі були розглянуті основні методи діагностування вібраційного стану роторних машин, до яких відносяться як традиційні, які добре зарекомендували себе на практиці, такі як спектральний аналіз, заснований на швидкому перетворенні Фур'є, так і більш нестандартні, такі як вейвлет – аналіз і кепстральний аналіз.

Вібраційний стан визначається сукупністю вібраційних характеристик об'єкта і є наслідком структурного та функціонального станів та динамічних властивостей об'єкта. Навіть при нормальному структурному та функціональному станах вібраційний стан може бути незадовільним через резонансні ефекти і паразитні коливання.

Одним з перспективних є методи, засновані на динамічних змінах в об'єкті, до найпростіших з яких відносять зміну знаку, швидкості і характеру процесів. Ці ознаки відображають розвиток дефекту в часі, що дозволяє робити прогноз на майбутній стан об'єкта та його працездатності.

Одним з ефективних методів досліджень вібраційних процесів, а також якості функціонування систем є моделювання механічної конструкції об'єкту. При побудові моделей визначають основні зв'язки між елементами об'єкта і властиві йому закономірності. Загальними за ступенем формалізації та зручними для дослідження є математичні та електромеханічні моделі.

Метод акустичної емісії заснований на виявленні, реєстрації та аналізі пружних коливань, що виникають при пластичній деформації твердих середовищ, розвитку дефектів (тріщини, мікротріщини, розшарування, корозія тощо), тертя, витоки (проходженні рідких і газоподібних середовищ через наскрізні дефекти).

Якщо спектр віброакустичного сигналу модульований однією або декількома частотами, що характерно для об'єктів, що містять зубчасті кінематичні пари, то ефективним прийомом визначення якості таких об'єктів є стиснення інформації шляхом логарифмування та здійснення перетворення Фур'є від логарифмічного спектру потужності, званого кепстром. Він дозволяє розділити інформацію про сигнал, отриману в результаті багаторазових відображень при нелінійних перетвореннях і модуляції. При цьому вся енергія віброакустичного сигналу, розсіяна по безлічі гармонік в спектральному методу, локалізується у однією складовою при кепстральному методі аналізу сигналу.

Кепстральний метод використовують для формування діагностичних ознак тільки в тих випадках, коли коливальний процес має періодично модульований спектр, що спостерігається при явищах нелінійного взаємодії вузлів і деталей механізмів, за наявності амплітудної та частотної модуляції, при перетвореннях типу згортки кількох часових процесів, а також при зміні фізичних параметрів механізму, зносі, зміну жорсткості, ударних взаємодіях.

### **3 АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА ВІБРОСИГНАЛУ МЕТОДОМ ВІЗУАЛЬНОГО ПРОГРАМУВАННЯ LABVIEW**

#### **3.1. Середовище візуального програмування LabVIEW.**

LabVIEW – програмне середовище для розробки віртуальних приладів. На сьогоднішній день LabVIEW є однією з найбільш популярних середовищ розробки віртуальних приладів, що дозволяє вченим і інженерам здійснювати взаємодію з великим набором устаткування і програмного забезпечення.

Основною особливістю LabVIEW є те, що це середовище графічного візуального програмування, що дозволяє з легкістю створювати користувальницький інтерфейс приладу, реалізовувати управління приладом, обробку та відображення даних. У LabVIEW ви маєте можливість розміщення на лицьових панелях ваших віртуальних приладів таких елементів як кнопки, перемикачі, лампочки, ручки регулювання, циферблати, графічні панелі і т. п., що дозволяє відтворювати зовнішній вигляд традиційних приладів.

Графічна мова програмування «G», яка використовується в LabVIEW, заснована на архітектурі потоків даних. Послідовність виконання операторів у таких мовах визначається не порядком їх програмування (як в імперативних мовах програмування), а наявністю даних на входах цих операторів. оператори, не пов'язані за даними, виконуються паралельно у довільному порядку.

Середовище LabVIEW, орієнтоване на розробку віртуальних приладів, містить в собі величезну кількість інструментів, призначених для роботи з різного роду пристроями та контрольно – вимірювальним обладнанням. Так, до складу середовища входять бібліотеки функцій для роботи з різними традиційними приладами, вбудованими пристроями збору даних, системами керування кроковими і серво–двигунами, пристроями відео – введення, приладами, що підключаються через інтерфейси GPIB / IEEE 488 і RS – 232 і по шині USB, ПЛІС, системами реального часу і ін. Крім цього, LabVIEW дозволяє працювати з

VXI (VME eXtension for Instrumentation) і PXI (PCI eXtension for Instrumentation) пристроями, що працюють на модифікованих шинах VME і CompactPCI.

Програма LabVIEW називається і є віртуальним приладом (англ. Virtual Instrument) й складається з двох частин:

- блочної діаграми, що описує логіку роботи віртуального приладу (Рисунок 3.1);
- лицьової панелі, що описує зовнішній інтерфейс віртуального приладу (Рисунок 3.2).

Віртуальні прилади можуть використовуватися в якості складових частин для побудови інших віртуальних приладів.

Лицьова панель віртуального приладу містить інструмент вводу – виводу, такі як кнопки, перемикачі, світлодіоди, верньєри, шкали, інформаційні табло і т. п. вони використовуються людиною для управління віртуальним приладом, а також іншими віртуальними приладами для обміну даними.

Блочна діаграма містить функціональні вузли, які є джерелами, приймачами і засобами обробки даних. Також компонентами блочної діаграми є термінали ("задні контакти" об'єктів лицьовій панелі) і керуючі структури (які є аналогами таких елементів текстових мов програмування, як умовний оператор «IF», оператори циклу «FOR», «WHILE» і т. п.). Функціональні вузли і термінали об'єднані в єдину схему лініями зв'язків.

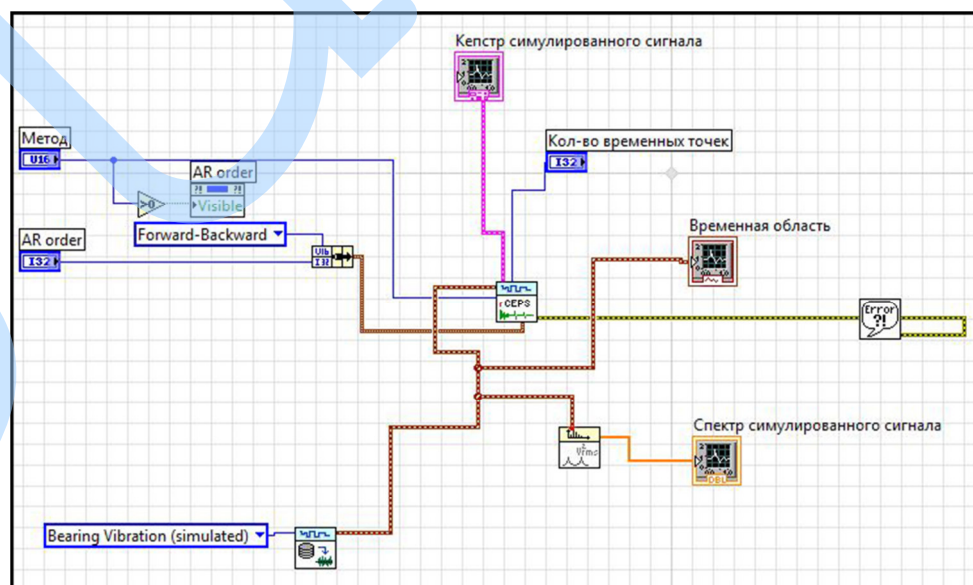




Рисунок 3.1 – Блок – схема віртуального приладу

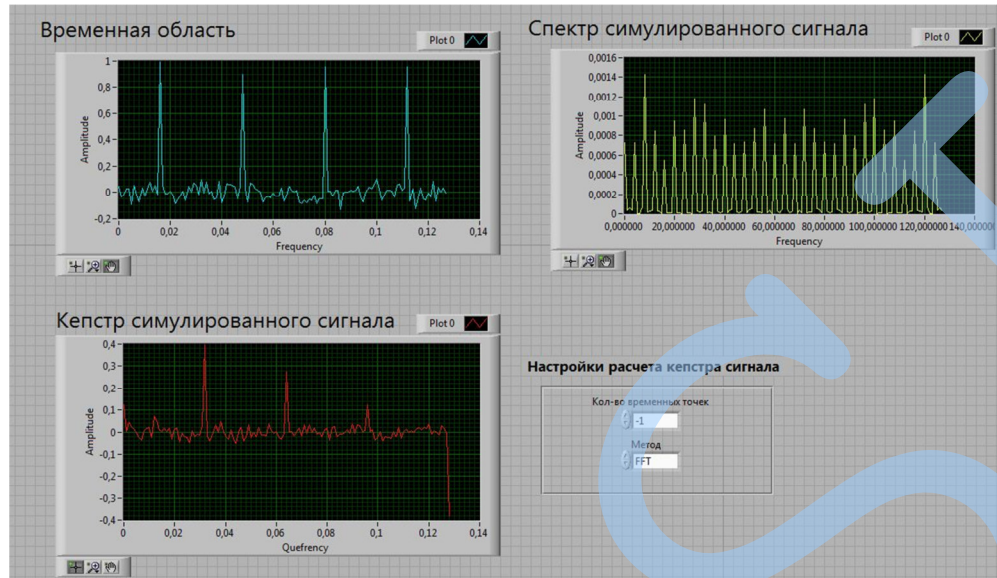


Рисунок 3.2 – Лицьова панель віртуального приладу

### 3.2. Інструменти середовища LabVIEW для аналізу і обробки сигналів.

Середовище візуального програмування LabVIEW містить великий список стандартних інструментів і готових рішень для різного типу аналізу сигналів. В додаток, існують відповідні доповнення і модулі, які значно розширюють можливості середовища LabVIEW для обробки та аналізу сигналів. Найбільш функціональними є 'Advanced signal processing toolkit' і 'Sound and Vibration toolkit'.

До стандартних інструментів обробки сигналів ставляться наступні інструменти (Рисунок 3.3):

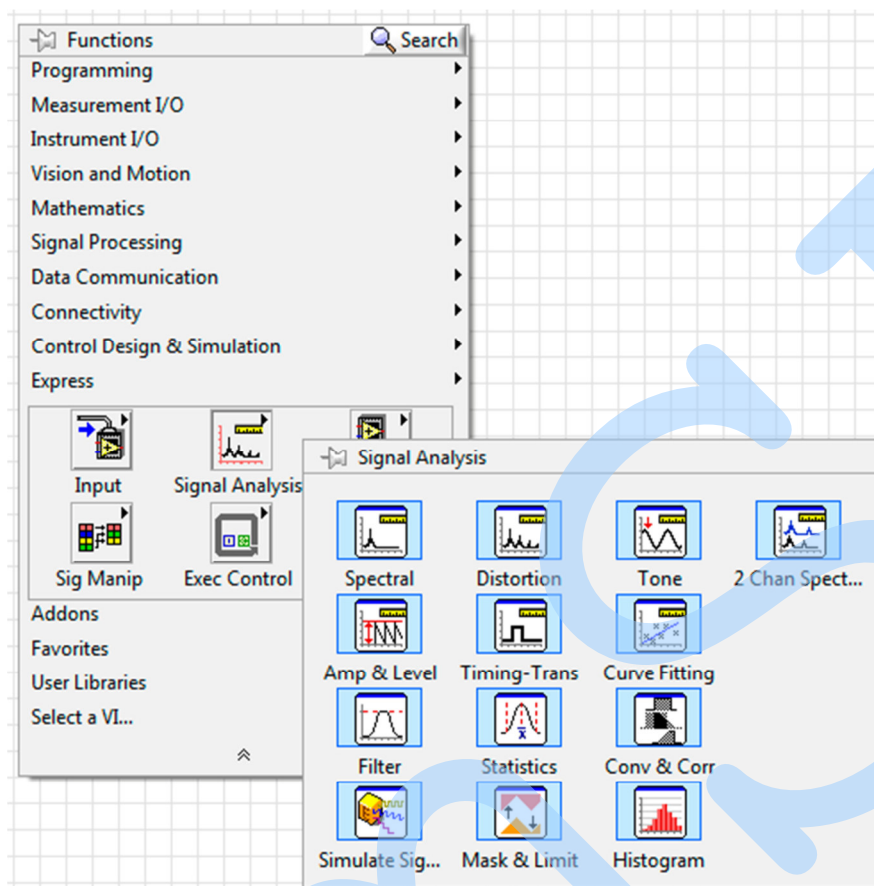


Рисунок 3.3 – Панель стандартних інструментів для обробки і аналізу сигналу ‘Signal Analysis Express VIs’

‘Spectral Measurements Express VI’ – обчислювальний блок, виконує спектральні вимірювання, такі як усереднений спектр, спектр потужності і фазовий спектр.

‘Filter Express VI’ – обчислювальний блок, виробляє фільтрацію сигналів.

‘Simulate Signal Express VI’ – блок генерації сигналів, моделює синусоїдальна, прямокутний, трикутний, пилкоподібний сигнали, а також шумовий сигнал.

‘Convolution and Correlation Express VI’ – обчислювальний блок, виробляє згортку, розгортку і кореляцію вхідних сигналів.

Наряду зі стандартними інструментами середовище візуального програмування LabVIEW має додаткові модулі, які значною мірою розширюють можливості обробки та аналізу даних.

Для більш глибокого аналізу сигналів служить зовнішній модуль ‘Advanced signal processing toolkit’, який дозволяє імітувати різного роду та виду сигнали, робити цифрову фільтрацію, осереднення і аналіз інформації.

До основних інструментів активного модуля відносяться компоненти, представлені в таблиці 3.1 и показані на рисунку 3.4.

Таблиця 3.1 – Інструменти модуля ‘Advanced signal processing toolkit’

‘Filters VIs’	обчислювальний блок, що містить набір різних фільтрів.
‘Signal Generation VIs’	Блок генерації сигналів. Інструменти цього блоку генерують різні форми сигналів.
‘Spectral Analysis VIs’	Блок спектральних перетворень сигналу.
‘Time Frequency Analysis VIs’	Блок трансформації часової області сигналу в частотну область.
‘Time Series Analysis VIs’	Блок попередньої обробки, сигналів, спектральних перетворень та кореляційних обчислень.
‘Waveform Conditioning VIs’	Блок для цифрової фільтрації і осереднення сигналів.
‘Waveform Generation VIs’	Блок генерації одно тональних, багато тональних сигналів, шумів.
‘Waveform Measurements VIs’	Блок обчислень стандартних часових та частотних вимірювань.
‘Wavelet Analysis VIs’	Блок вейвлет – аналізу сигналів.

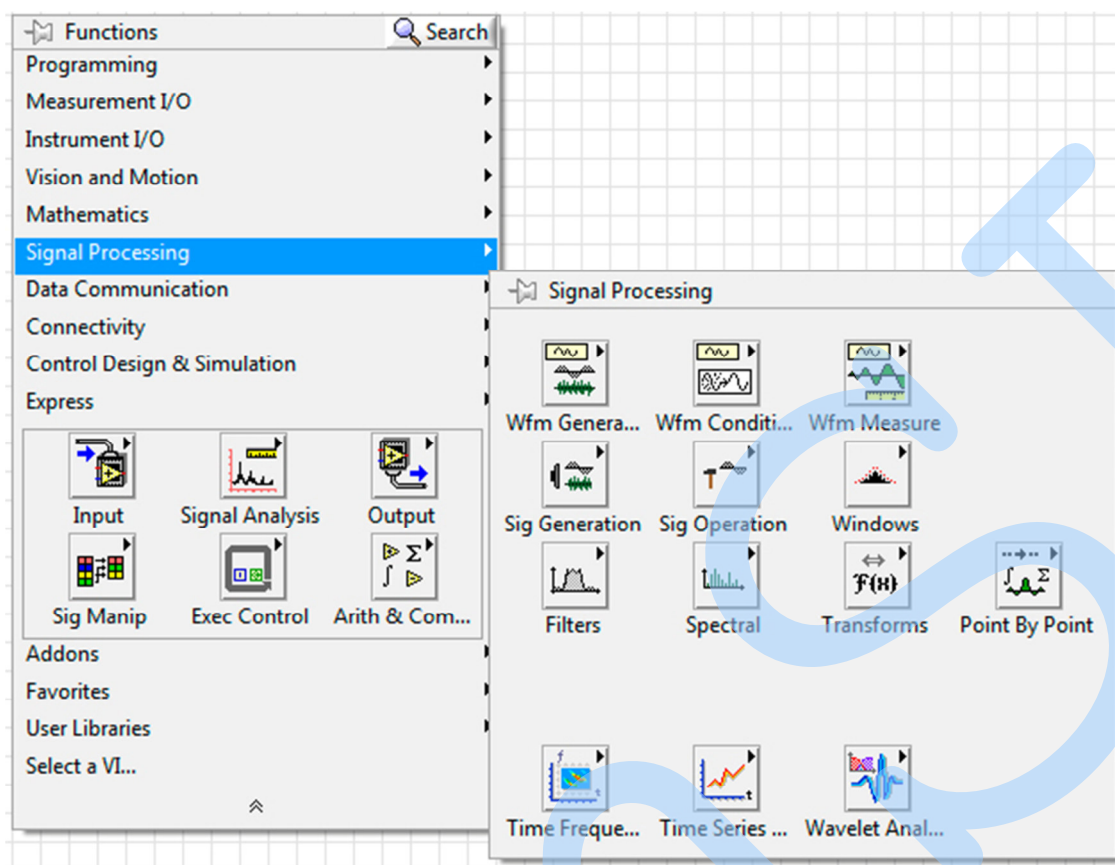


Рисунок 3.4 – Панель інструментів зовнішнього модуля ‘Advanced signal processing toolkit’ для обробки і аналізу сигналу

Іншим важливим доповненням для аналізу і обробки сигналів в середовищі LabVIEW є зовнішній модуль ‘Sound and Vibration toolkit’. Інструменти даного розширення роблять звукові вимірювання та вібраційні обчислення.

До основних інструментів даного модуля відносяться компоненти, представлені в таблиці 3.2 і на рисунку 3.5.

Таблиця 3.2 – Інструменти модуля ‘Signal and Vibration toolkit’

‘Calibration VIs’	Набір інструментів для калібрування мікрофонів, акселерометрів та інших датчиків.
‘Distortion VIs’	Набір інструментів для обчислення спотворених обчислень.
‘Frequency Analysis VIs’	Набір інструментів, робота яких заснована на швидкому перетворенні Фур'є.

‘Generation VIs’	Набір інструментів генерації одно тональних, багато тональних сигналів, шумів.
‘Integration VIs’	Інструменти для знаходження швидкості або переміщення за замірами прискорення.
‘Limit Testing VIs’	Набір інструментів для обмеження дослідження часових форм, спектру, XY інформації, ідентифікованих піків або скалярних замірів.
‘Octave Analysis VIs’	Інструменти для октавного аналізу.
‘S&V Express Measurements VIs’	Інструменти для розробки алгоритмів аналізу звукових і вібраційних вимірювань
‘Scaling VIs’	Інструменти для масштабування сигналів.
‘Single Tone Measurements VIs’	обчислювальні блоки для одно тональних сигналів.
‘Sound Level VIs’	Набір інструментів для аналізу звукових вимірювань.
‘Transient Analysis VIs’	Аналіз нестационарних сигналів.
‘Vibration Level VIs’	Аналіз рівня вібрації.

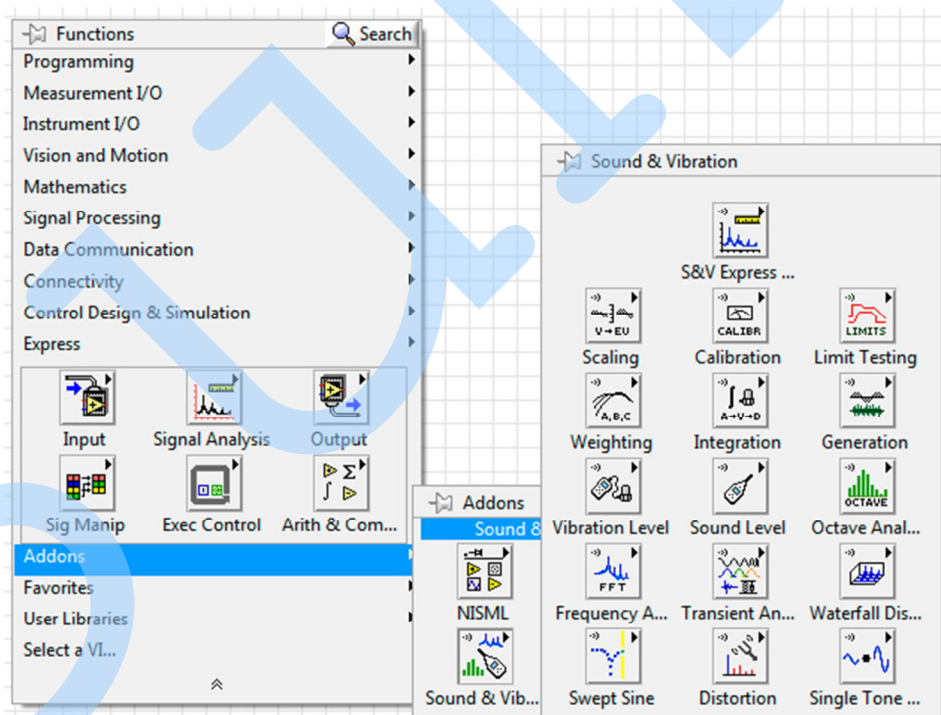


Рисунок 3.5 – Панель інструментів зовнішнього модуля ‘Sound and Vibration toolkit’ для обробки і аналізу сигналу

### 3.3. Завдання і функції розроблюваного додатку.

Необхідно визначити завдання і функції розроблюваного додатку.

По – перше, програма мусить відкривати і зчитувати звуковий файл, перетворювати інформацію в масив даних. Для даної операції використовується компонент ‘Sound File Read Simple.VI’, представлений на рисунку 3.6. Даний блок автоматично відкриває, зчитує інформацію і закриває звуковий файл.

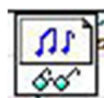


Рисунок 3.6 – Блок зчитування звукових файлів ‘Sound File Read Simple.VI’

Зчитана інформація повинна відображатися на графіку як часова область сигналу.

Зчитані дані з часової області повинні бути перетворені в частотну область, тобто програма має здійснити спектральний аналіз вхідного сигналу. Для даної мети використовується стандартний обчислювальний інструмент ‘Spectral Measurements.vi’, представлений на рисунку 3.7.

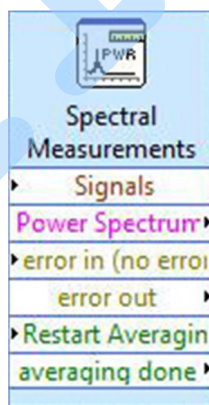


Рисунок 3.7 – Блок спектральних обчислень ‘Spectral Measurements Express vi’

Для порівняльного аналізу будуватиметься також спектральна щільність. Для цієї мети використовується компонент зовнішнього модуля ‘Time Series Spectrum.vi’, представлений на рисунку 3.8.



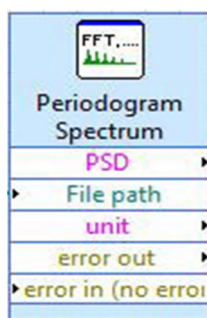


Рисунок 3.8 – Блок обчислення спектральної щільності ‘Time Series Spectrum.vi’

Головним завданням програми є кепстральний аналіз сигналу. Для досягнення даної мети використовується ‘Time Series Cepstrum Express vi’, , представлений на рисунку 3.9. Даний блок розраховує реальний кепстр сигналу.

Результати виводяться через графічні блоки.

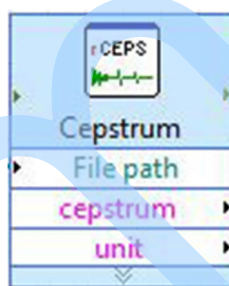


Рисунок 3.9 – ‘Time Series Cepstrum Express vi’

### 3.4 Висновки

Середовище візуального програмування LabVIEW надає користувачу великий набір інструментів і готових рішень для аналізу і обробки сигналів.

Стандартний набір інструментів ‘Signal Analysis Express VIs’ дозволяє робити аналіз, обробку, перетворення сигналів, а також імітувати різні типи часових форм.

Для розширення можливостей середовища LabVIEW з обробки сигналів служать зовнішні модулі, такі як ‘Advanced signal processing toolkit’ і ‘Sound and Vibration toolkit’. Дані доповнення дозволяють робити більш детальний і



глибокий аналіз сигналів, включаючи і кепстральний аналіз, реалізація якого є головним завданням розроблюваного додатку.

Позначені завдання і функції, програми що розробляється в середовищі LabVIEW. Додаток повинен відкривати і зчитувати звуковий файл, виводити часову область сигналу на графік, виконувати спектральний аналіз, будувати спектр і спектральну щільність, робити кепстральну обробку вхідної інформації та відображати результати у вигляді кепстру сигналу.

## 4 КЕПСТРАЛЬНЕ УЯВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВІБРОСИГНАЛУ В СЕРЕДОВИЩІ ВІЗУАЛЬНОГО ПРОГРАМУВАННЯ LABVIEW

### 4.1. Алгоритм розробки програми для кепстрального аналізу вібросигналу.

Раніше були позначені основні завдання і функції конструйованої програми: відкривати і зчитувати звуковий файл, відображати часову форму сигналу, робити спектральний і кепстральний аналіз інформації.

Перший етап – вибір певного вібросигналу. Для цієї мети використовується компонент ‘File Path’ (компонент «1» на рисунку 4.1), який визначає положення звукового файлу на жорсткому диску персонального комп'ютера.

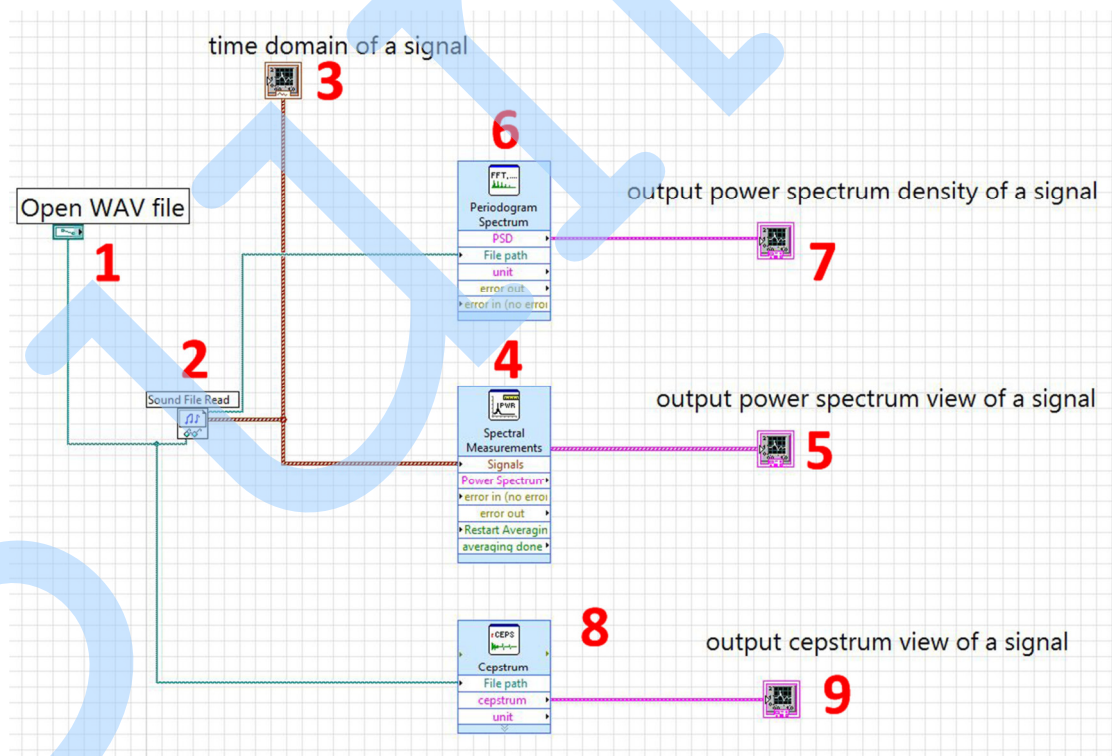


Рисунок 4.1 – Блок – схема додатку для кепстрального аналізу сигналу

Потім файл відкривається, зчитується і закривається за допомогою блоку ‘Sound File Read Simple.vi’ (компонент «2» на рисунку 4.1).

Далі відображається часова область на графіку (компонент «3» на рисунку 4.1).

Для перетворення часової форми сигналу в частотну служить компонент ‘Spectral Measurements Express vi’ (компонент «4» на рисунку 4.1), який виконує спектральний аналіз інформації. Вхідними даними для даного інструменту є зчитаний вібросигнал, на виході – спектр сигналу, відображений на графіку (компонент «5» на рисунку 4.1).

Для аналізу розподілу енергетичної складової в частотній області будується також спектральна щільність. Для цієї мети використовується компонент зовнішнього модуля ‘Time Series Spectrum.vi’ (компонент «6» на рисунку 4.1). Вхідними даними для даного інструменту є зчитаний вібросигнал, на виході – спектральна щільність сигналу, відображена на графіку (компонент «7» на рисунку 4.1).

Головним завданням програми є кепстральний аналіз сигналу. Для досягнення даної мети використовується компонент зовнішнього модуля ‘Time Series Cepstrum Express vi’, робота якого заснована на 2 ключових опціях: метод для обчислення кепстру сигналу – FFT, кількість часових точок – вся часова область сигналу (компонент «8» на рисунку 4.1). Даний блок розраховує реальний кепстр сигналу, який відображається на відповідному графіку (компонент «9» на рисунку 4.1).

Інструмент має налаштування, наведені в таблицях 4.1 – 4.3 і на рисунку 4.2.

Додаток складається з дев'яти елементів: трьох обчислювальних блоків, чотирьох графіків, одного блоку зчитування інформації, одного елемента для визначення місцезнаходження звукового файлу. На рисунку 4.3 представлений зовнішній інтерфейс розробленої програми.

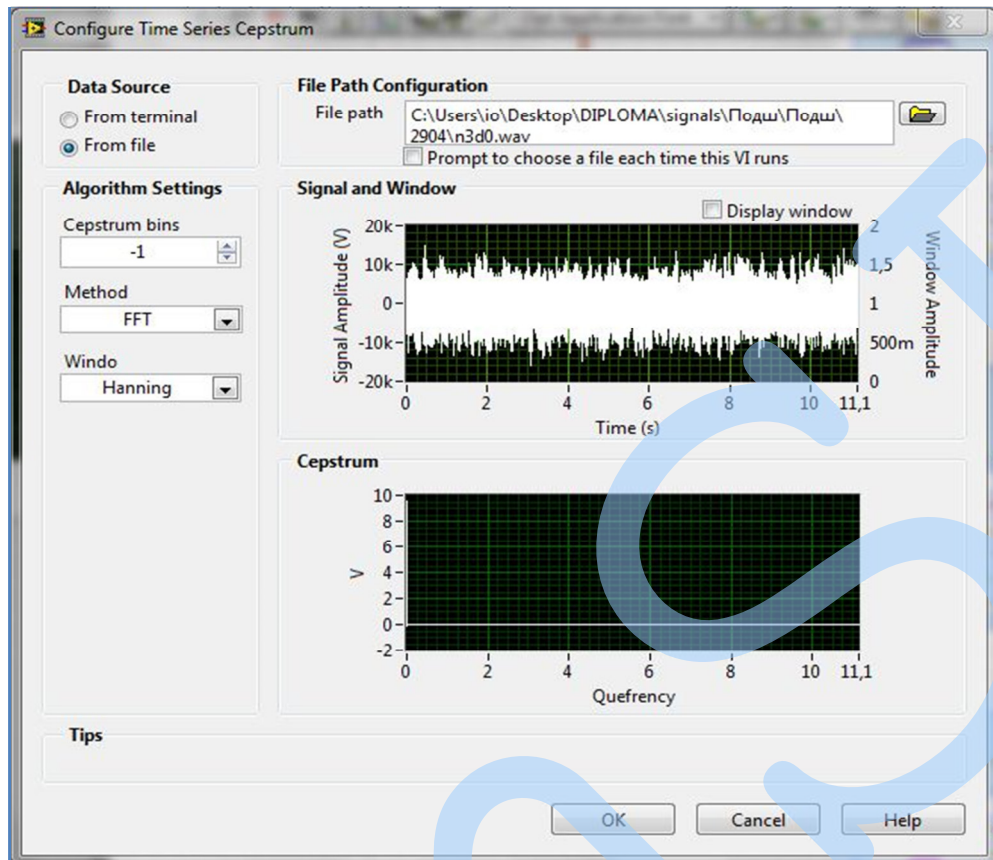


Рисунок 4.2 – Налаштування інструменту ‘Time Series Cepstrum Express vi’

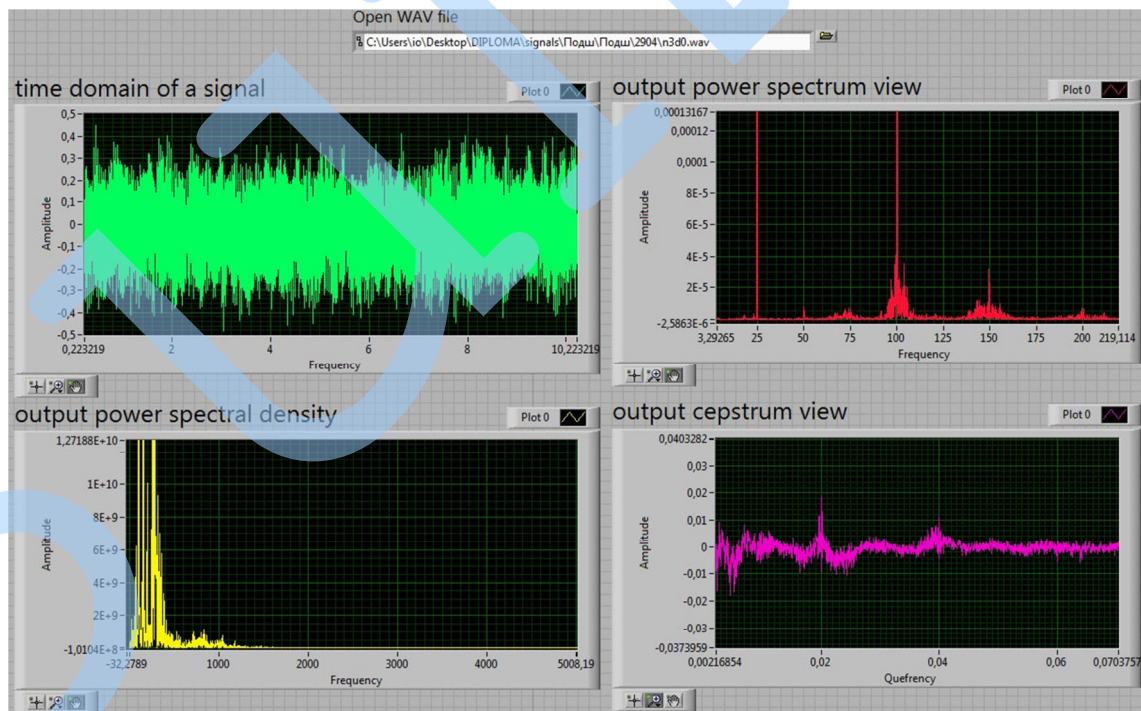


Рисунок 4.3 – Зовнішній інтерфейс розробленого додатку

Таблиця 4.1 – Налаштування обчислювального блоку ‘Time Series Cepstrum Express vi’

Параметр	опис
<b>Data Source</b>	Визначає джерело інформації для кепстрального аналізу: з внутрішнього терміналу або файлу. <b>From terminal</b> – інформацією служить джерело даних на діаграмі (наприклад, масив даних зчитаного файлів). <b>From file</b> – інформація зчитується з файлу розширення.TXT або .WAV.
<b>File Path Configuration</b>	<b>File path</b> — визначає і відображає шлях до файлу, який аналізується. Ця опція доступна тільки якщо обрано пункт <b>From file</b> в секції <b>Data Source</b> .
<b>Algorithm Settings</b>	<b>Cepstrum bins</b> — визначає кількість часових точок, для яких обчислюється кепстр. Значення за замовчуванням 128. <b>Method</b> — визначає метод для обчислення кепстру. опція включає <b>AR Model</b> (за замовчуванням) і <b>FFT</b> . <b>AR order</b> — визначає послідовність у авторегресивної моделі. <b>Method of AR Model</b> — визначає метод розрахунку авторегресивної моделі. <b>Window</b> — визначає метод осереднення часової області сигналу. опція доступна тільки для методу <b>FFT</b> .
<b>Signal and Window</b>	Відображення вихідного і осередненого сигналу. <b>Display window</b> — відображає осереднений сигнал.
<b>Cepstrum</b>	Відображає кепстр одновимірного сигналу.

Таблиця 4.2 – Вхідні дані для обчислювального блоку ‘Time Series Cepstrum Express vi’

Параметр	опис
<b>Xt</b>	Визначає часову послідовність для кепстрального аналізу. <b>Xt</b> доступний тільки якщо обрано пункт <b>From terminal</b> в опції <b>Data Source</b> .
<b>File path</b>	Визначає і відображає шлях до файлу, який аналізується. Ця опція доступна тільки якщо обрано пункт <b>From file</b> в секції <b>Data Source</b> .



Таблиця 4.3 – Вихідні дані для обчислювального блоку ‘Time Series Cepstrum Express vi’

Параметр	опис
<b>cepstrum</b>	Повертає інформацію у виді реального кепстру вхідної інформації.
<b>error out</b>	описує помилки, що виникли під час виконання програми.

#### 4.2. Обробка та аналіз результатів.

В лабораторних умовах були отримані вібросигнали з підшипників кочення, які мають різні види дефектів. Експеримент проводили на моделі роторної машини (рисунок 4.4).

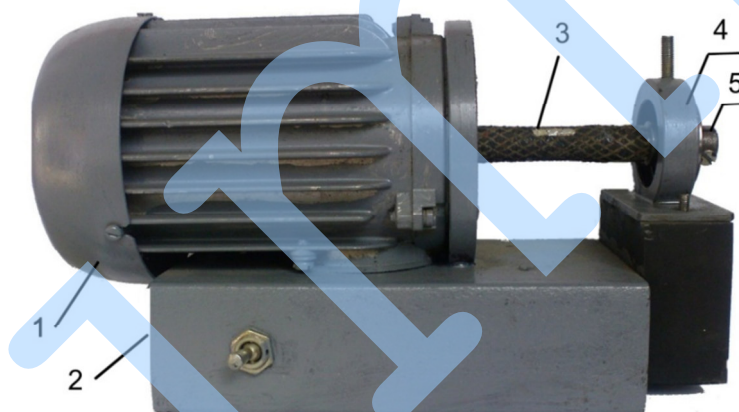


Рисунок 4.4 – Лабораторна установка: 1 – привід; 2 – основа установки; 3 – гнучка муфта; 4 – підшипник; 5 – вага для дисбалансу

Геометричні дані підшипників були взяті з електронного довідника (рисунок 4.5).

Дані сигнали були проаналізовані та опрацьовані за допомогою розробленого в середовищі LabVIEW додатку.

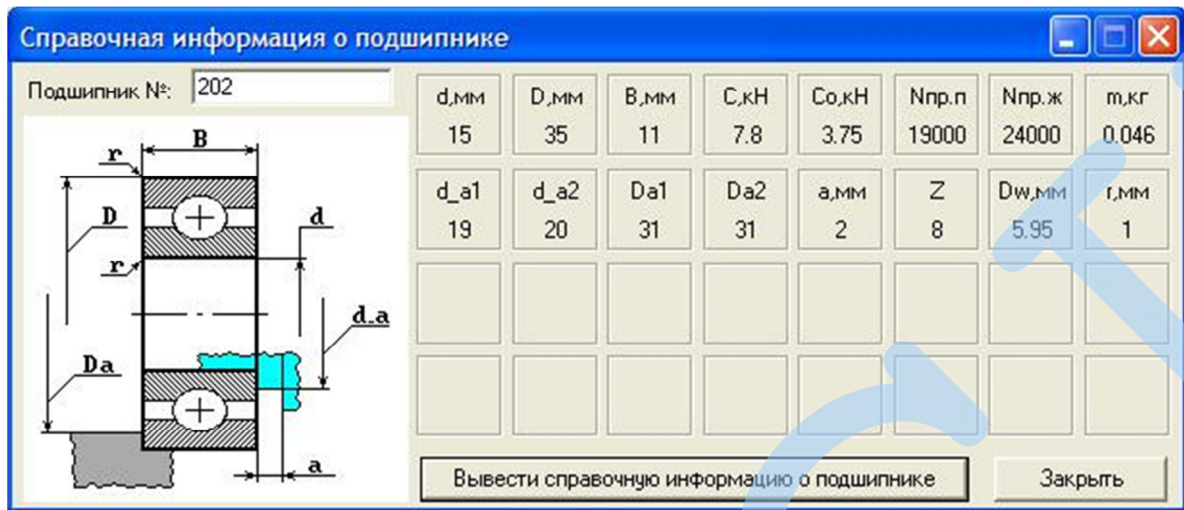


Рисунок 4.5 – Геометричні параметри досліджуваних підшипників

На основі геометричних показників були прораховані характерні частоти підшипників: частота обертання тіл качення 50Гц, перекочування тіл качення по внутрішньому кільцю 124Гц, перекочування тіл качення по зовнішньому кільцю 76Гц. Для їх визначення використовувався калькулятор підшипникових частот (рисунок 4.6).

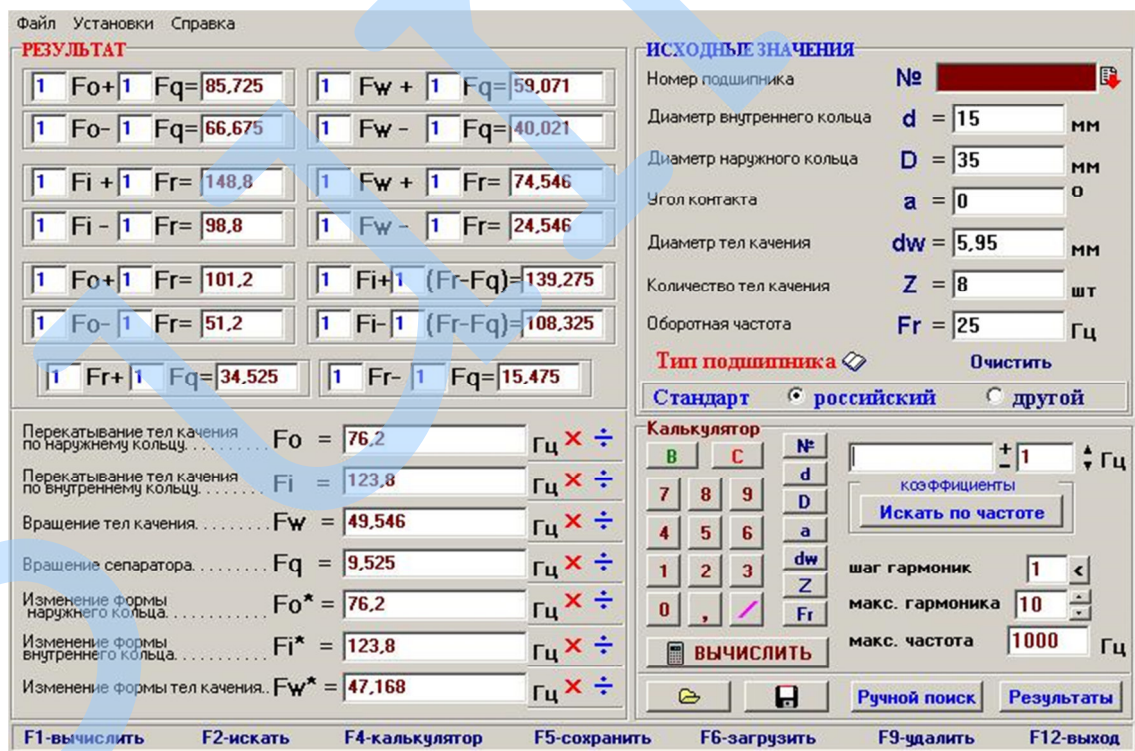


Рисунок 4.6 – Калькулятор підшипникових частот



Взаємозв'язок між спектральним і кепстральним поданням сигналу приведена на малюнках 4.7 – 4.10.

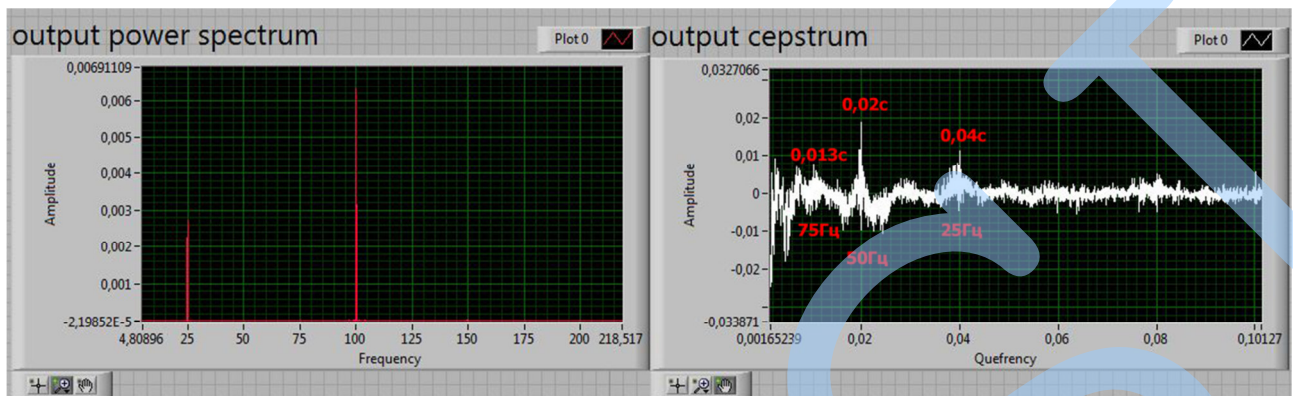


Рисунок 4.7 – Спектр і кепстр сигналу підшипника з дефектом зовнішньої обойми

На рисунку 4.7 в кепстральній області сигналу явно виражена складова з сачтотою 0,04с, що відповідає оборотній частоті 25Гц. Також присутній характерний пік з кепстральним часом 0,02с, який вказує на частоту обертання тіл кочення підшипника. На частоту перекочування тіл кочення по зовнішньому кільцю вказує сачтота 0,013с(75Гц).

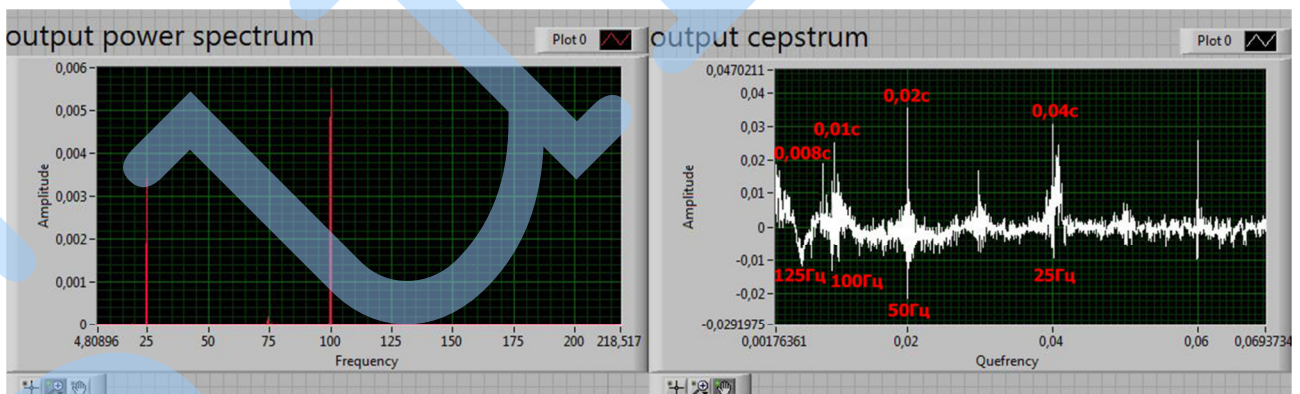


Рисунок 4.8 – Спектр і кепстр сигналу підшипника з дефектом внутрішньої обойми

В даному випадку був досліджений вібросигнал підшипника з дефектом внутрішньої обойми. На рисунку 4.8 кепстр показує явні періодичності,

відповідні оборотній частоті (25Гц), частоті обертання тіл кочення (50Гц). На частоту перекочування тіл кочення по внутрішньому кільцю вказує сachtота 0,008с(123Гц).

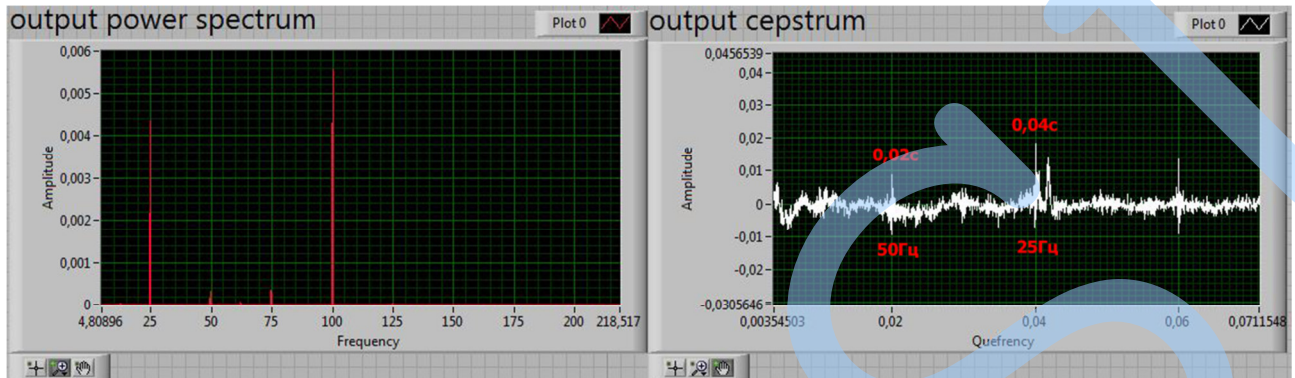


Рисунок 4.9 – Спектр і кепстр сигналу підшипника с дефектом тіл кочення

На рисунку 4.9 кепстральний вид вібросигналу явно показує оборотну частоту и частоту обертання тіл кочення, що підтверджується заздалегідь відомим дефектом діагностованого підшипника.

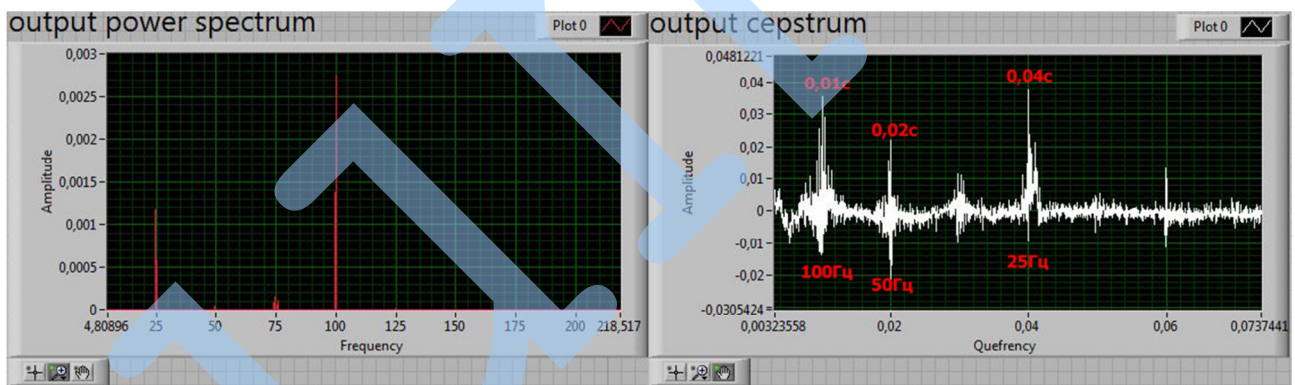


Рисунок 4.10 – Спектр і кепстр сигналу «чистого» підшипника

На рисунку 4.10 кепстр показує оборотну частоту і частоту обертання тіл кочення. Також підвищені піки спостерігаються в області сachtоти 0,01с, що відповідає частотами перекочування тіл кочення із зовнішньої і внутрішньої обойм.

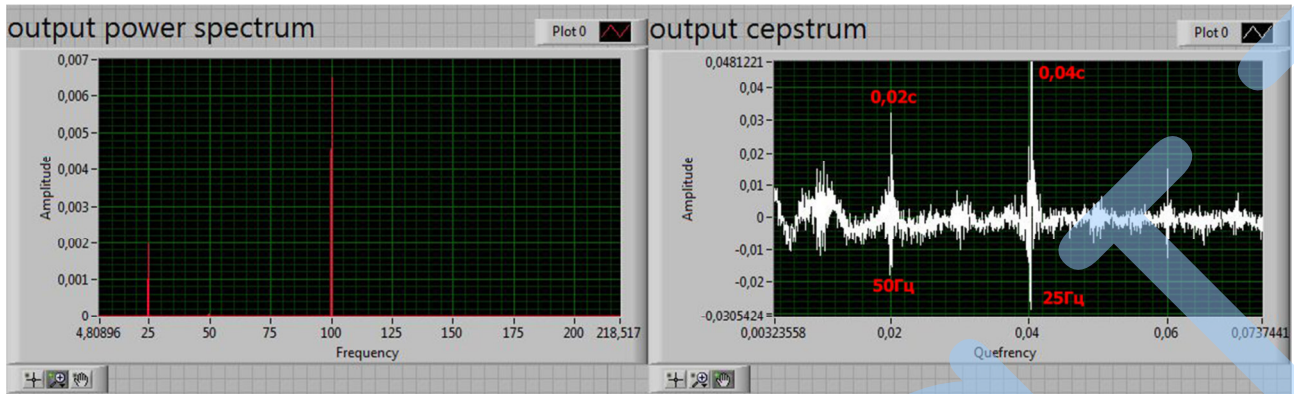


Рисунок 4.11 – Спектр и кепстр сигнала підшипника з невідомим дефектом

На рисунку 4.11 кепстральний вид вібросигналу явно показує оборотну частоту і частоту обертання тіл кочення. На цій підставі можна припустити, що в підшипнику присутній дефект тіл кочення.

Загалом, кепстральний аналіз вважається ефективним інструментом для пошуку складових спектра сигналу. На практиці інтерпретація та аналіз кепстру носить складний і неочевидний характер. Якщо у спектрі частотні складові мають фізичний сенс, сигнал з такою частотою і амплітудою дійсно присутній у часовій області у вихідному сигналі, то наявність гармонік в кепстрі може зовсім не означати що у початковому спектрі існують відповідні періодичності.

### 4.3 Висновки

Для реалізації кепстрального аналізу сигналу, була обрана середовище візуального програмування LabVIEW. Даний програмний комплекс надає широкий спектр інструментів і обчислювальних блоків для аналізу і обробки сигналів.

Розроблено додаток в середовищі LabVIEW для обробки вібрації. Програма складається з 9 блоків, виконує зчитування звукового файлу, спектральний і кепстральний аналіз.

Для кепстрального аналізу вібрації використовується компонент зовнішнього модуля 'Time Series Cepstrum Express v1', робота якого заснована на 2 ключових опціях: метод для обчислення кепстру сигналу – FFT, кількість часових точок – вся часова область сигналу.

Результати носять двозначний характер: з одного боку кепстр сигналу підтверджує частотну інформацію спектру сигналу, але з іншого боку, відображає додаткову інформацію, інтерпретація якої є складним і неоднозначним процесом.

В цілому, даний вид аналізу є потужним і ефективним доповненням до традиційного спектрального аналізу. На практиці, кепстральний вид сигналу може допомогти виявити явно не виражені в спектрі частотні складові. Тому кепстральний аналіз слід розглядати як доцільний додаток до спектрального аналізу.



## ВИСНОВКИ

Віброакустична діагностика є найбільш прийнятною для оцінки технічного стану роторних машин. Вона найбільш повно відображає природу явищ, що супроводжують протікання в них робочих процесів, і використовує у якості джерела інформації вібросигнал, який володіє великою інформаційною ємністю, має малу інерційність, велику швидкість поширення, широкий частотний і динамічний діапазони. Ці якості вібрації дозволяють оперативно, а при використанні ПК і в реальному масштабі часу, оцінювати технічний стан об'єкта діагностики.

В основі прогнозування надійності лежить оцінка зміни вихідних параметрів технологічного обладнання в часі при різних вхідних даних, на підставі чого можна зробити висновок про показники надійності при різних умовах і методах експлуатації. Прогнозування надійності технологічного обладнання зводиться до прогнозування працездатності, ймовірності безвідмовної роботи, прогнозування залишкового технічного ресурсу.

Розширюючи область пізнання питань прогнозування на основі діагностування, можна вирішувати питання прогнозування стосовно технічного стану і надійності різних видів техніки.

В роботі виконано огляд існуючих методів аналізу вібраційного стану об'єкту. На даний момент існує велика різноманітність підходів і методів аналізу вібраційного стану машини, але на практиці не можна виділити який – небуть універсальний спосіб, що дозволяє за сигналом точно визначити стан механізму. Тому існує тенденція до пошуку та впровадженню все нових і більш ефективних способів дослідження вібрації.

За допомогою міжнародних стандартів проведено оцінювання невизначеності результатів опосередкованого визначення несинхронного обертання роторних машин під час її вимірювального контролю. Традиційним

для вібродіагностики є спектральний аналіз – метод обробки сигналів, що дозволяє виявити частотний склад сигналу.

На практиці, отриманий спектр для сигналу може бути складним і малоінформативним і явно неможливо виділити періодичності, пов'язані з певного роду дефектом в механізмі, тому для розшифрування спектру можна спробувати отримати кепстр сигналу ("спектр логарифма спектру"). В цілому, кепстр сигналу – це зворотне перетворення Фур'є від логарифма спектру сигналу.

Кепстральний аналіз, як найменш вивчений і нестандартний, був обраний для подальшої експериментальної перевірки його ефективності. В лабораторних умовах були отримані вібросигнали з підшипників кочення з різними видами дефектів.

Для реалізації кепстрального аналізу вібрації було обране середовище візуального програмування LabVIEW. Даний програмний комплекс надає широкий спектр інструментів і обчислювальних блоків для аналізу і обробки сигналів.

Розроблено додаток в середовищі LabVIEW для обробки вібрації. Програма складається з 9 блоків, виконує зчитування звукового файлу, відображення тимчасової форми інформації, спектральний і кепстральний аналіз.

Для кепстрального аналізу вібрації використовується компонент зовнішнього модуля 'Time Series Cepstrum Express vi', робота якого заснована на 2 ключових функціях: метод для обчислення кепстру сигналу – FFT, кількість часових точок – вся часова область сигналу.

Результати носять неоднозначний характер: з одного боку кепстр сигналу підтверджує частотну інформацію спектрального аналізу, але з іншого боку, дає додаткову інформацію, інтерпретація якої є складним і неоднозначним процесом.

В цілому, даний вид аналізу є потужним і ефективним доповненням до традиційного спектрального аналізу. На практиці, кепстральний вид сигналу може допомогти виявити явно не виражені в спектрі частотні складові. Тому

кепстральний аналіз слід розглядати як доцільний додаток до спектрального аналізу.

Надалі складений алгоритм реалізації кепстрального аналізу може використовуватися для більш глибокої і детальної обробки вібросигналів.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bogert, B.P., Healy, H.J.R., Tukey, J.W., The Quefrency Analysis of Time Series fox Echoes: Cepstrum, Pseudo auto covariance, Cross Cepstrum and Saphe Cracking, Proceedings of a Symposium on Time Series Analysis by M. Rosenblatt, (Ed.), Wiley, N.Y., 1963, pp. 209-243.
2. Childers, D.G., Skinner, D.P., Kemerait, R.C., The Cepstrum: A Guide to Processing, Proceedings of the IEEE, Vol. 65, no. 10, oct. 1977.
3. Stakenborg, M.J.L., On the Use of Cepstrum Analysis in Gearbox Monitoring, Report WFW 84.025, University Eindhoven, aug. 1984.
4. Randall, R.B. Cepstrum analysis and gearbox fault diagnosis; Briiel & Kjaer application, note, Bruel & Kjaer Naerum Press, Denmark, 1973.pp. 4-5. Randall, R.B.
5. Cepstrum analysis in machine health monitoring using vibration analysis. Canadian Acoustical Association, Vancouver, Canada, October 1983, pp. 1-15. Volen, R.H.
6. Naseer Kehtarnavaz, Namjin Kim, Digital Signal Processing System-level design using LabVIEW, University of Texas at Dallas, 2007.
7. Мэтью Д., Альфредсон Р. Применение вибрационного анализа для контроля технического состояния подшипников качения: Пер. с англ.- Конструирование и технология машиностроения.- М.: Мир, 1984.-т. 106, №3.- с.100-108.
8. Барков А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам. // Судостроение.- 1985.-№ 3.- с.21-23.
9. Болотин В.В. Прогнозирование ресурсов машин и конструкций.- М.: Машиностроение, 1984.-312с.
10. Явленский К.Н., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем.-Л.: Машиностроение, 1983.-239с.

11. Прогрессивные методы и приборы, обеспечивающие снижение расходов по техническому обслуживанию машин: Препринт фирмы Карл Шенк, 1986.- 82с.
12. Рябыкин С.А., Кваснин В.В. Применение кепстрального анализа для вибродиагностики зубчатых передач//Приборостроение (Киев).-1985.- вып.37.-с.93-95.
13. Технические средства диагностирования: Справочник / Под общ. ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 1989. - 672 с.
14. Горелик Д.Л., Скрипник В.А. Методы распознавания. - М.:Высш. шк., 1977. - 222 с.
15. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. - М.Машиностроение, 1971. - 224 с.
16. Интеллектуальный автомат: компьютер в качестве эксперта: Пер. с нем. - М.: Энергоатомиздат, 1991. -80 с.
17. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. - М.:В Изд-во стандартов, 1976. - 272 с.
18. Коллакот Р.А. Диагностирование механического оборудования. - Л.: Судостроение, 1980. - 296 с.
19. Щавелин В.М., Сарычев Г.А. Исследование акустического излучения, возникающего в зоне фрикционного контакта твердых тел. // Трение и износ. - 1983. - Т. 4, N 5, - с. 808-815
20. Биргер И.А. Техническая диагностика.- М.: Машиностроение, 1978.-239с.
21. Суворов В.Н. О кепстральном анализе в популярной форме – <http://www.picad.com.ua/0406/pdf/ing2.pdf>