

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ДИПЛОМНА РОБОТА

бакалавра

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ЧАС-ЧАСТОТНОГО АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ РАМИ АВТОГРЕЙДЕРА

Завідувач кафедри, канд. техн. наук, доцент



О. І. Богатов

Нормоконтролер, канд. техн. наук



М. В. Москаленко

Консультант, канд. техн. наук, доцент



О. В. Крайнюк

Керівник, канд. техн. наук, доцент



О. І. Богатов

Студент гр. ММ-36т1-20



В. П. Кравченко


Харків – 2023

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Факультет механічний
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри



 О. І. Богатов
«3» квітня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кравченко Володимир Павлович

1. Тема роботи: «Розроблення методики час-частотного аналізу вібрацій рами автогрейдера».
Керівник роботи Богатов Олег Ігорович, канд. техн. наук, доцент
Затверджені рішенням Вченої ради механічного факультету "31" березня 2023 року протокол № 31.
2. Строк подання студентом роботи 10.06.2023 р.
3. Вхідні дані до роботи: 1 ТТХ дорожніх машин; 2 Режим роботи – під навантаженням (динамічний); 3 Кількість вимірюваних величин – одна; 4 Швидкість руху: до 50 км/год.
4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1 Вступ; 2 1) Обґрунтування необхідності підвищення точності вимірювання параметрів вібрацій дорожніх машин; 2 Методика вимірювань параметрів вібрацій дорожніх машин з використанням вейвлет-аналізу; 3 Проведення вимірювань та аналіз результатів вимірювання параметрів вібрацій ДМ з використанням вейвлетів при динамічних навантаженнях; 4 Охорона праці і навколишнього середовища; 5 Висновки; 6 Список літератури.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

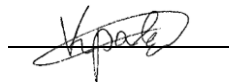
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Канд. техн. наук, доц. Крайнюк О. В.	03.04.2023 	08.06.2023 

7. Дата видачі завдання 03 квітня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

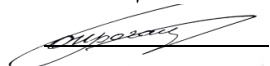
№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вивчення літератури.	3 квітня – 17 квітня 2023 р.	виконано
2.	Вивчення необхідності підвищення точності вимірювань вібрацій дорожніх машин в динамічному режимі	18 квітня – 24 квітня 2023 р.	виконано
3.	Розробка методики вимірювань параметрів вібрацій ДМ з використанням вейвлет аналізу.	19 квітня – 26 квітня 2023 р.	виконано
4.	Проведення вимірювань та аналіз результатів вимірювання параметрів вібрацій ДМ з використанням вейвлетів при динамічних навантаженнях.	27 квітня – 15 травня 2023 р.	виконано
5.	Формулювання результатів проведення досліджень	16 травня – 23 травня 2023 р.	виконано
6.	Формулювання висновків.	24 травня – 27 травня 2023 р.	виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки.	28 травня – 4 червня 2023 р.	виконано
8.	Створення презентації на Power Point.	5 червня – 7 червня 2023 р.	виконано
9.	Подання роботи керівнику.	8 червня 2023 р.	виконано
10.	Подання роботи на рецензію.	10 червня 2023 р.	виконано

Студент



Кравченко В. П.

Керівник роботи



Богатов О. І.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота бакалавра: 78 с., 29 рис., 1 таб., 14 джерел, 1 додаток
АВТОГРЕЙДЕР, ПАРАМЕТРИ ВІБРАЦІЇ, ДИНАМІЧНІ
НАВАНТАЖЕННЯ, ФУР'Є ПЕРЕТВОРЕННЯ, ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ,
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА.

Об'єкт дослідження – процес визначення вібрації рами автогрейдера ДЗк250В в різних динамічних режимах роботи.

Мета роботи – розроблення методики час-частотного аналізу вібрацій рами автогрейдера.

Методи дослідження – системного аналізу, математичного моделювання, теорії ймовірності і випадкових процесів, математичної статистики і теорії похибок вимірювань.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні методики визначення вібрації рами автогрейдера ДЗк-250В в різних динамічних режимах роботи з використанням час-частотного методу.

Практична значимість результатів, отриманих в роботі, полягає в тому, що розроблена методика час-частотного аналізу вібрацій може бути використана при обґрунтуванні напрямків удосконалення рами автогрейдера, при розробці технічної документації на засоби технічної діагностики, створенні нормативно-технічних документів з питань проведення калібрування бортової вимірювальної інформаційної системи.

Результати роботи можуть бути також використані у вищих навчальних закладах при підготовці фахівців за спеціальністю 175 "Інформаційно-вимірювальні технології".

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	7
1 Обґрунтування необхідності підвищення точності вимірювання параметрів вібрацій дорожніх машин.....	8
1.1 Параметри вібрацій дорожніх машин при різних динамічних навантаженнях	9
1.2 Висновки до розділу.....	15
2 Розробка методики час-частотного аналізу вібрацій рами автогрейдера...	16
2.1 Обґрунтування необхідності використання вейвлетів при вимірюванні параметрів вібрацій	20
2.2 Методика вейвлет-аналізу вимірювальних сигналів вібрацій дорожніх машин.....	25
2.3 Висновки до розділу.....	34
3 Аналіз результатів вимірювань параметрів вібрацій рами автогрейдера з використанням час-частотного аналізу	35
3.1 Дослідження параметрів вібрацій конструктивних елементів автогрейдера.....	38
3.2 Алгоритм вейвлет-аналізу вимірювальних часових вибірок.....	42
3.3 Висновки до розділу	47
4 Охорона праці і навколишнього середовища.....	48
4.1 Висновки до розділу	57
Висновки.....	58
Перелік посилань.....	60
Додаток Б Ілюстративний матеріал до дипломної роботи	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГОСТ – міждержавний стандарт

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

ППФ – пряме перетворення Фур'є

ШПФ – швидке перетворення Фур'є

ЗПФ – зворотне перетворення Фур'є

ВП – вимірювальний перетворювач

ДМ – дорожня машина

ВДТ – відеодисплейні термінали

ПК – персональний комп'ютер

ЕПТ – електронна променева трубка

НШПФ – небезпечні і шкідливі виробничі фактори

СКО – середньоквадратичне відхилення

ГДК – гранично допустимі концентрації

ВСТУП

Сучасні технології вимагають безперервного контролю за багатьма параметрами технологічного процесу і контролю стану устаткування. Одними з найважливіших є параметри механічного руху, зокрема параметри періодичних переміщень досліджуваного об'єкту в просторі (вібрації). Цими параметрами є вібропереміщення (амплітуда вібрації) і віброшвидкість (частота вібрації).

Підвищення точності вимірювання вібрацій в дорожніх машинах є основним напрямом забезпечення їх надійності. Особливе значення має проектування дорожніх машин на заданий ресурс і збереження їх проектної якості при виготовленні і експлуатації.

Об'єкт дослідження – вібраційний процес взаємодії деталей агрегатів автогрейдерів, який створює проблему системного підходу в підвищенні точності вимірювання вібрацій.

Основним методом теоретичних досліджень був системний аналіз, узагальнення ознак вібраційних сигналів, вібраційних характеристик, статистичних даних про граничні значення структурних і вібраційних параметрів їх зв'язку з технічним станом автогрейдерів і режимами його роботи.

Точність та достовірність вимірювальної інформації на виході інтелектуальної інформаційної системи в значній мірі залежить від розміщення первинних датчиків-перетворювачів, правильного їх вибору та методик проведення вимірювань. Узагальнення і розробка методів підвищенні точності вимірювання вібрацій в автогрейдерах за їх вібродіагностичними характеристиками на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації має значний науковий інтерес в галузі машинобудування.

1 ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙ ДОРОЖНІХ МАШИН

Вібрація серед всіх видів механічних впливів для технічних об'єктів найбільш небезпечна. Знакозмінні напруження, викликані вібрацією сприяють накопиченню пошкоджень в матеріалах, появі тріщин та руйнуванню. Найчастіше і досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах за умов резонансу. Вібрації викликають також й відмови машин, приладів.

Вібрація – це рух елемента, або механічної системи, при якому відбувається коливання, що характеризує його скалярну величину[1].

Основними параметрами вібрації є:

- амплітуда вібропереміщення – χ_m , м;
- амплітуда коливальної швидкості (віброшвидкості) – V_m , м/с;
- амплітуда коливального прискорення (віброприскорення) – a_m , м/с²;
- період коливань - T , с;
- частота коливань - f , Гц=1/с.

Через специфічні властивості органів чуття визначає при оцінці дії вібрації є значення вище перерахованих параметрів, що діють. Значення віброшвидкості [2], що так діє, є середньоквадратичне миттєвих значень швидкості $V(t)$ за час усереднювання t_y , яке вибирають з урахуванням характеру зміни віброшвидкості в часі:

$$V_y = \sqrt{1/t_y \int_t^{t+t} V^2(t) dt}. \quad (1.1)$$

Таким чином, для характеристики вібрацій використовують спектри значень, що діють, параметрів або середніх квадратів останніх.

У практиці віброакустичних досліджень весь діапазон частот вібрацій розбивають на октавні діапазони. У октавному діапазоні верхня гранична частота у два рази більше нижньої $f_2/f_1 = 2$. Аналіз і побудова спектрів параметрів вібрації

можуть проводитися також в третьоктавних смугах частот – $f_2/f_1 = \sqrt[3]{2}$. Якщо f_1 – нижня гранична частота, а f_2 – верхня, то в якості частоти, що характеризує смугу, береться середньгеометрична частота $f_{c2} = \sqrt{f_1 \times f_2}$.

Середньгеометричні частоти октавних смуг частот вібрації стандартизовані і складають: 1; 2; 4; 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000 Гц.

Оскільки абсолютні значення параметрів, що характеризують вібрацію, змінюються в дуже широких межах, то на практиці використовують поняття логарифмічного рівня коливань [2]. Логарифмічний рівень коливань – характеристика коливань, що порівнює дві однойменні фізичні величини, пропорційні десятичному логарифму відношення оцінюваного і початкового значення величини. В якості початкової частоти використовують значення частоти, від якої починають відлік. Вимірюються рівні в дБ. Тоді рівень віброшвидкості визначатиметься по формулі:

$$L_V = 10 \log (\overline{V^2} / \overline{V_0^2}) = 20 \log (V_y / V_0), \quad (1.2)$$

де V_y - усереднене значення віброшвидкості у відповідній смузі частот;

V_0 - опорне значення віброшвидкості, рівне 5×10^{-8} м/с, міжнародна стандартна величина. Рівень віброприскорення визначається виразом:

$$L_a = 20 \log \frac{a}{10^{-6}}. \quad (1.3)$$

1.1 Параметри вібрацій дорожніх машин при різних динамічних навантаженнях

Діагностування стану машин і оцінка ступеня небезпеки пошкодження на основі даних контролю вібрації - один з найбільш ефективних методів підвищення надійності і довговічності устаткування [3].

Вібровимірювальна апаратура служить для дослідження механічного стану рами автогрейдера з метою виявлення дефектів на ранніх стадіях їх виникнення. Спостерігаючи за зміною параметрів вібрації в характерних для даного виду рами точках, можна визначити вигляд і місцеположення дефекту, оцінити ступінь його небезпеки, а отже, і необхідність ремонту.

Вібровимірювальну апаратуру використовують при експлуатації роторних машин всіх типів (авіаційних двигунів, турбін, насосів, компресорів, вентиляторів), застосовують для контролю якості збірки і наладки об'єктів, визначення стану інструменту у верстатах і багатьох інших випадках.

Ступінь ефективності застосування штатної вібровимірювальної апаратури і розширення її функцій зростає у міру накопичення даних аналізу вібрації машини в різних режимах роботи автогрейдера.

Простою формою вібрації є гармонічне коливання тіла, яке як функція часу є синусоїдою, поширеніша форма вібрації - квазігармонійна з безперервною зміною частоти [4]. Найбільша частина коливань, що зустрічаються на практиці, має форму спотвореної синусоїди. Для опису цієї форми вібрації використовують метод перетворення Фур'є, що полягає в тому, що будь-яку періодичну залежність розглядають як комбінацію ряду гармонічних коливань з взаємозалежними частотами. Якщо функція $x(t)$ може бути представлена рядом Фур'є $x(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin \lambda \omega t + \dots$, то параметри $A_1, \omega; A_2, \lambda, \omega_i \dots$ називають амплітудами і частотами (першою, другою і т. д.) відповідних гармонічних складових.

Гармонійні складові визначають частотний спектр вібрації, який представляється графічним набором дискретних ліній.

До параметрів лінійної вібрації відносяться переміщення, швидкість, прискорення, різкість, силу і потужність. До параметрів кутової вібрації відносяться кут повороту, кутове прискорення, кутову різкість, момент сил. До параметрів обох видів вібрацій відносять також фазу, частоту і коефіцієнт нелінійних спотворень [5]. Миттєве значення координати положення крапки при коливальному русі називають переміщенням і позначають $s(t)$.

Першу похідну переміщення за часом називають: швидкістю $v = \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s}$, другу – прискоренням $a = \frac{d^2s(t)}{dt^2} = \ddot{s}$, третю – різкістю $u = \frac{d^3s(t)}{dt^3} = \dddot{s}$.

Опис ряду вібраційних процесів приведено в таблиці 1.1 [3, 4]. Переміщення як діагностичний параметр становить інтерес у тих випадках, коли необхідно знати відносний зсув об'єкта або деформацію. Якщо досліджують ефективність вібраційних машин, а також вплив вібрацій на організм людини, то вивчають швидкість вібрації, оскільки саме вона визначає імпульс сили і кінетичну енергію. Основним вимірюваним параметром є прискорення, проте в ряді випадків дослідників цікавить і різкість вібрацій [4]. Вимірюють миттєві, амплітудні (пікові), що діють і середні значення параметрів вібрації. Періодичну вібрацію поділяють на гармонічну і полігармонічну. Полігармонійний процес складається з постійної x_0 і нескінченної кількості синусоїдальних гармонік з амплітудами x_n і початковими фазами φ . При цьому частоти всіх гармонік кратні основній частоті f_1 , що видно із спектру полігармонійного процесу без урахування початкових фаз (див. табл. 1.1) [3, 4].

При дослідженні полігармонійних вібрацій доцільно використовувати параметри, безпосередньо пов'язані з енерговміст коливань. У цьому випадку найбільш важливими характеристиками є середнє арифметичне, середньоквадратичне і пікове значення коливного параметра.

Якщо фізичний зміст задачі дозволяє розділити розглянутий діапазон на ділянки, то їх називають піддіапазонами або смугами частот. Ширину смуги виражають в інтервалах; при цьому інтервал, для якого $f_v = 2f_n$ називають октавою.

Неперіодичні вібраційні процеси поділяють на майже періодичні і перехідні [3, 4]. Майже періодичні процеси можуть бути описані функцією часу, наведеною в табл. 1.1, де не всі відносини являють собою раціональні числа. Такі процеси частіше зустрічаються при підсумуванні двох або більшого числа незалежних гармонійних процесів. Частоти гармонік такого процесу несумірні. При майже періодичних вібраціях вимірюваними параметрами є діючі і пікові значення параметрів вібрації та форма коливань.

Таблиця № 1.1 - Періодичні та неперіодичні вібраційні процеси

Вид процесу	Функція часу	Форма	Частотний спектр
гармонічний	$s(t) = s \sin(\omega t + \varphi)$ $s(t) = s \sin 2\pi f_0 t$		
полігармонічний	$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n \times$ $\times f t + b_n \sin 2\pi n f_1 t)$ $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \times \cos 2\pi n f_1 t dt$ $n = 1, 2, 3 \dots$ $s(t) = s_0 + \sum_{n=1}^{\infty} s_n \times$ $\times \cos(2\pi n f t - \varphi_n)$ $s_0 = \frac{a_0}{2}$ $s_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ $n = 1, 2, 3 \dots$ $\varphi_n = \arctg(b_n/a_n)$ $n = 1, 2, 3 \dots$		
майже періодичний	$s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} s_n \times$ $\times \sin(2\pi f_n t + \varphi)$		
перехідний	$s(t) = \begin{cases} A e^{-at} \cos bt & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ $s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-2\pi j f t} dt$		

Перехідні неперіодичні процеси численні і різноманітні. Основна їх відмінність полягає в тому, що вони не можуть бути представлені у вигляді дискретного спектра. Процес, для якого зміна фізичної величини в часі відбувається випадковим чином, називається випадковим. Такий процес характеризується випадковою функцією часу $x(t)$ яку можна розглядати як нескінченну сукупність або безліч функцій $\{x(t)\}$, званих вибірковими, кожна з яких представляє одну з можливих реалізацій випадкової функції. Випадковий процес можна описати в будь-який момент часу усередненням ймовірнісних характеристик по безліч вибіркових функцій.

Для вимірювання параметрів вібрації використовують різні фізичні принципи перетворення механічних коливань в електричний сигнал.

За принципом роботи перетворювачі абсолютної вібрації розділяють на генераторні і параметричні вимірювальні перетворювачі (ВП) .

Генераторні ВП здійснюють пряме перетворення механічної енергії в електричний сигнал. До них відносять ВП, дія яких заснована на ефекті Хола, п'єзоелектричні, індукційні і інші.

Параметричні ВП є пристроями, в яких під дією вимірюваних вхідних механічних параметрів змінюються електричні параметри схем: опір, ємність, частота і так далі.

До параметричних ВП відносяться резистори, реостатні, тензорезистивні, ємкісні, індуктивні, трансформаторні, магнітопружні, вихрострумові, вібраційно-частотні, електронно-механічні і ін.

З всього різноманіття існуючих ВП найбільшого поширення набули перетворювачі з п'єзоелектричним, тензорезистивним, електромагнітним (індуктивним), ємнісним і струнним чутливим елементом. Кожен з перерахованих ВП має свою сферу раціонального застосування. Так, п'єзоелектричні ВП найдоцільніше використовувати за наявності в динамічному процесі широкого спектру частот (до декількох десятків тисяч герц) і великих значень прискорень. Тензорезистивними, індуктивними, ємнісними і вібраційно-частотними ВП доцільно одночасно вимірювати змінну і постійну складову динамічного процесу.

Дані ВП є контактними, їх закріплюють на досліджуваному об'єкті і кабелем сполучають з контрольною - вимірювальною апаратурою.

Переваги безконтактних вимірювань вібрації полягають в можливості проведення вимірювань з підвищеною точністю в труднодоступних місцях в умовах високих температур і агресивних середовищ за наявності різних зовнішніх фізичних полів. У безконтактних вимірюваннях реалізується кінематичний принцип вимірювання параметрів вібрацій і використовуються оптичні, радіохвильові, акустичні, радіаційні, електромагнітні і магнітні методи (рисунок 1.1).

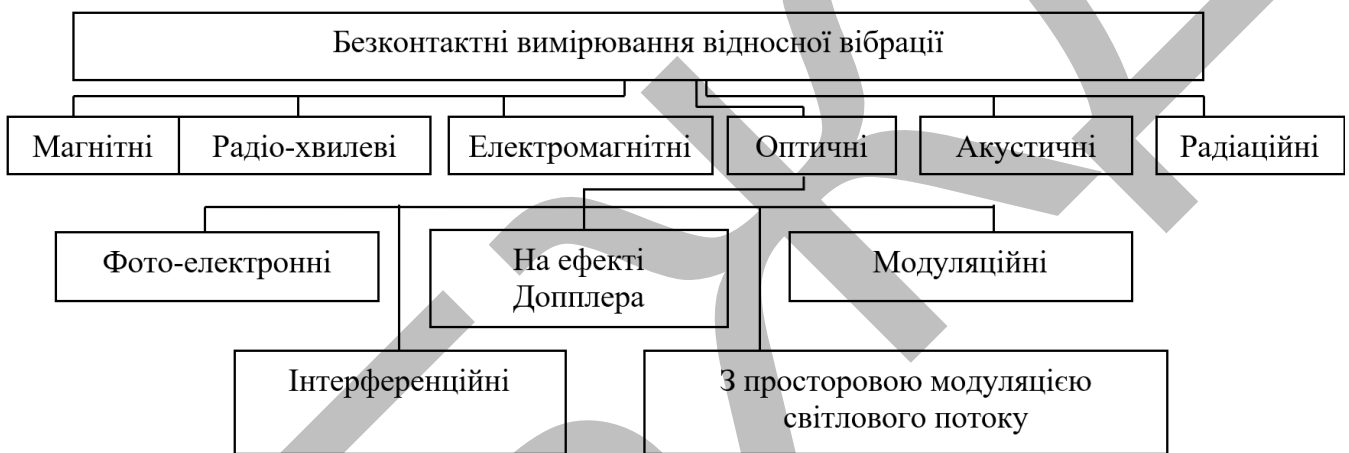


Рисунок 1.1 – Класифікація методів вимірювання відносної вібрації

Оптичні методи вимірювання параметрів вібрації за способом виділення інформації про вимірюваний параметр ділять на амплітудні і частотні. До амплітудних методів вимірювання відносять фотоелектронні, дифракційні і інтерференційні методи вимірювання, а також методи з використанням просторової модуляції світлового потоку.

Вимірювання параметрів вібрації, засноване на зміні частоти випромінювання оптичного генератора, відбитого від об'єкту, проводять вимірювальними пристроями, дія яких заснована на використанні ефекту Доплера.

Метод вимірювання вибирають з урахуванням конкретного завдання, а також можливості забезпечення необхідної похибки вимірювання, чутливості методу, діапазону вимірюваних параметрів.

У основу вибору вібровимірювальної апаратури мають бути покладені результати аналізу вібрації даного класу устаткування і дані про амплітудно-частотний склад вібрації і характер його вимірювання у зв'язку з виникненням різних видів несправностей небезпечних для функціонування машини. Чим більше число однотипних машин обстежене і більший об'єм даних статистично оброблено, тим достовірніший буде висновок про характер вібрації машини і його зміну при виникненні дефектів.

При виборі апаратури насамперед слід встановити місцеположення точок контролю, необхідне і достатнє число контрольованих точок, число вимірюваних компонентів в кожній точці вимірювання, контрольований параметр вібрації, діапазон частот, в якому виникнення характерного і небезпечного дефекту приводить до зміни амплітуд окремих гармонійних складових спектру або загального рівня вібрації.

Механічний стан працюючої машини оцінюють спостереженням одним з параметрів, що характеризує загальний рівень вібрації: розмахом вібропереміщення, середньоквадратичним значенням віброприскорення.

1.2 Висновки до розділу

Вібрацію більшості дорожніх машин, як правило, визначають по розмаху вібрацій модульних елементів дорожньої машини. Для машин з складним спектром вібрації слід використовувати апаратуру, що має в робочому діапазоні частот рівномірну амплітудно-частотну і пропорційну (або нульову) фазочастотну характеристики.

Статистична обробка матеріалів вібраційних досліджень дорожніх машин дозволяє складати карти розпізнавання дефектів. За цими даними можна приймати рішення про ознаки дефектів і вибрати частотний діапазон апаратури, необхідний для виявлення характерних несправностей машини. У всіх випадках верхня межа частотного діапазону не має бути нижче подвоєної частоти вібрацій в даному динамічному режимі роботи ДМ.

2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ЧАС-ЧАСТОТНОГО АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ РАМИ АВТОГРЕЙДЕРА

За допомогою вейвлетів сигнал представляється сукупністю хвильових пакетів-вейвлетів, утворених на основі деякої вихідної (базової) функції [5]. Ця сукупність різна в різних частинах часового інтервалу визначення сигналу і коректується множниками. Множники мають вид складних часових функцій, і є сигналом з тим або іншим ступенем деталізації (рисунок 2.1).

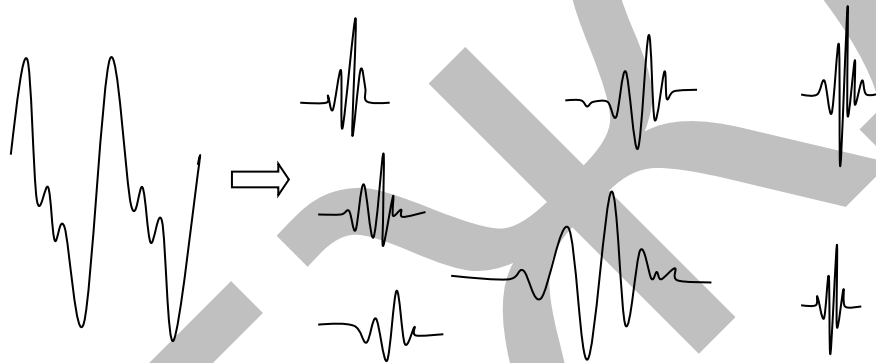


Рисунок 2.1 - Ілюстрація до вейвлет синтезу сигналу

Такий метод аналізу вимірних сигналів називають вейвлет-аналізом сигналів. Вейвлет-аналіз в розумінні, на жаль, істотно складніше, ніж перетворення Фур'є. Тому для практичного застосування вейвлетів важливо чітко зрозуміти відмінності між цими перетвореннями. Основоположна відмінність - втрата інформації і часу існування частотних компонент сигналу при звичайному Фур'є-перетворенні ми вже відзначали. В основі подання періодичного сигналу $y(t)$ рядом Фур'є лежить співвідношення:

$$y(t) \sim \sum_{n=0}^N c_n e^{itn}, \quad (2.1)$$

де i - уявна одиниця.

Функція $y(t)$ представляється сумою синусоїд, представлених членом e^{itn} , на коефіцієнти Фур'є c_n . Вони обчислюються як:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} y(t) e^{-itn} dt, \quad (2.2)$$

Коефіцієнти Фур'є – комплексні числа. Вони представляють набір (спектр) гармонійних сигналів, які називаються гармоніками. Число n - номер гармоніки (1,2,3 і т. д.). Теоретично ряд Фур'є має нескінченне число членів (гармонік), але на практиці воно завжди обмежене. Тому ряд записується як наближений. Гармоніки, що представляють собою синусоїди з різною частотою, кратною частоті першої гармоніки, і різною фазою, утворюються множенням c_n на e^{itn} [5, 6].

З позицій точного уявлення перетворенням Фур'є довільних сигналів і функцій можна відзначити цілий ряд його недоліків:

- непридатність до аналізу нестационарних сигналів;
- перетворення Фур'є навіть для однієї заданої частоти вимагає знання сигналу не тільки в минулому, а і у майбутньому часі, що є теоретичною абстракцією;
- в умовах практично неминучого обмеження числа гармонік, чи спектра коливань точне відновлення сигналу після прямого і зворотного перетворення Фур'є теоретично (і, тим більше, практично) неможливо, зокрема, через появу ефекту Гібса [5];
- базисною функцією при розкладанні в ряд Фур'є є гармонійне (синусоїдальне) коливання, яке математично визначено в інтервалі часу від $-\infty$ до $+\infty$ і має незмінні у часі параметри;
- чисельне інтегрування в часовій області від $-\infty$ до $+\infty$ при прямому перетворенні Фур'є (ППФ) та від $-\infty$ до $+\infty$ в частотній області при зворотному перетворенні Фур'є (ЗПФ) зустрічає великі обчислювальні труднощі;
- окремі особливості сигналу (наприклад, розриви або піки) викликає незначні зміни частотного образу сигналу у всьому інтервалі частот від $-\infty$ до $+\infty$, які «розмазуються» по всій частотній осі, що робить їх виявлення за спектром практично неможливим;

– ясно, що така плавна базисна функція, як синусоїда, в принципі взагалі не може представляти перепади сигналів з нескінченною крутизною, хоча такі сигнали (наприклад, прямокутні імпульси) застосовуються досить широко;

– єдиним пристосуванням до подання швидких змін сигналів, таких, як згладжування або перепади, є різке збільшення числа гармонік, які впливають на форму сигналу та їх характер;

– для нестационарних сигналів (а таких зараз більшість) викають значні труднощі ППФ і ОПФ.

Проблеми спектрального аналізу частково вирішуються переходом до віконного перетворення Фур'є. Ідея цього перетворення дуже проста: часовий інтервал існування сигналу розбивається на ряд проміжків – часових вікон. У кожному проміжку обчислюється своє перетворення Фур'є. Якщо в якомусь вікні існували частотні складові деякого сигналу, то вони будуть присутні і в спектрі. А якщо ні – будуть відсутні. Таким чином, можна перейти до час-частотного зображення сигналів, яке є особливим розділом техніки обробки сигналів.

Віконне перетворення виконується з використанням виразу:

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot w(t - b) \cdot e^{-i\omega t} dt . \quad (2.3)$$

Тут, на відміну від інтеграла Фур'є, функція $y(t)$ під знаком інтеграла додатково множиться на віконну функцію $w(t, b)$. Параметр b вікна задає його зсув на часовій осі. Зазвичай задається ряд фіксованих значень b в межах повного вікна [7]. Наприклад, для найпростішого прямокутного вікна функція $w(t, b)$ у межах вікна дає 1, а за межами вікна перегляду – 0. При цьому, для кожного вікна виходить свій набір комплексних амплітуд сигналу в частотній області (рисунок 2.2).

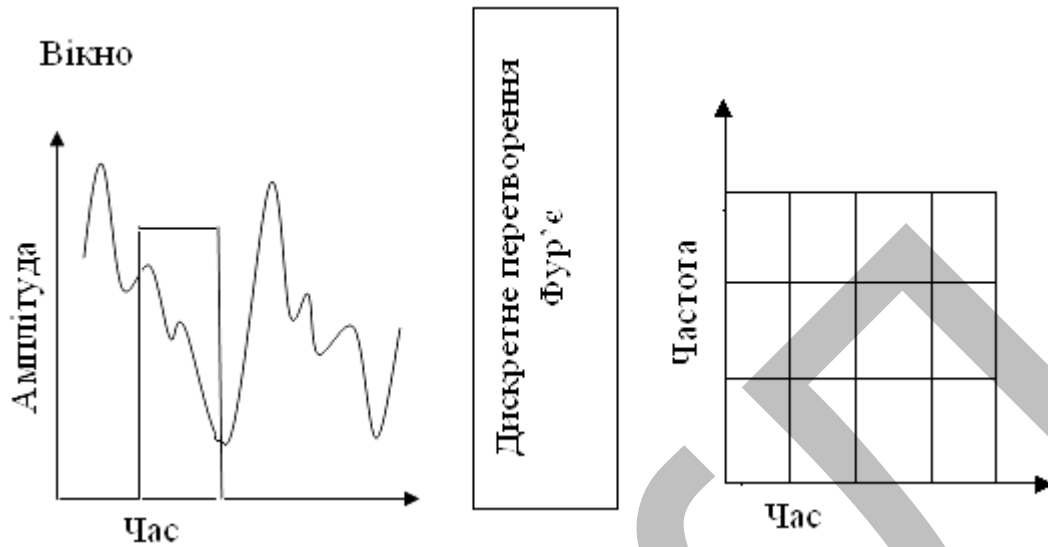


Рисунок 2.2 - Ілюстрація до методики віконного перетворення Фур'є

Вікно, показане на часовій залежності сигналу (ліва частина рисунку 2.2), стрибками переміщується, і за деяке число таких переміщень дозволяє «переглянути» весь сигнал. У кожному вікні виконується своє спектральне розкладання, так що замість однієї спектрограми отримуємо набір спектрограм, схематично показані в правій частині рисунку 2.2 у вигляді прямокутників.

Природно, що оскільки кожне вікно охоплює невелику ділянку за часом, точність опису локальних змін сигналу може бути підвищена. Часто використовуються вікна Гауса, що забезпечують малі спотворення спектра через граничні явища і зменшують прояв ефекту Гібса.

Проте ситуація не так проста. Вона викликана відомим принципом невизначеності Гейзенберга. Згідно з ним, неможливо отримати одночасно високу частоту та високе часове розрізнення. Вибираючи вікно з малою шириною в часі отримуємо високе часове розрізнення [6, 7]. Взнявши вікно з великою шириною в часі отримуємо гарне розрізнення по частоті, але погане в часі. Віконне перетворення оперує з вікнами, які мають однакову ширину, а тому дане протиріччя для нього не вирішується.

Ще один принциповий недолік віконного перетворення Фур'є: у ньому як і раніше використовується єдина базисна функція – синусоїда з усіма її зазначеними раніше недоліками.

2.1 Обґрунтування необхідності використання вейвлетів при вимірюванні параметрів вібрацій

Істотним недоліком спектрів, отриманих при звичайному перетворенні Фур'є, є їх мала інформативність. Локальні особливості сигналів, наприклад короткі сплески чи провали, розриви і сходинки і т. д. ведуть до появи в спектрі вищих гармонік з малою амплітудою, розмазаних по всій частотній осі. Визначити по них характер локальних особливостей досить важко. Кардинальне вирішення цього завдання криється в застосуванні вейвлет-перетворень. Але й на основі використання Фур'є-перетворень також був запропонований ряд сучасних методів спектрального аналізу, що дозволяють з високою детальністю представляти спектри складних сигналів [5, 6, 7]. Деякі з уявлень спектра, мають певні переваги навіть перед вейвлет-перетвореннями.

Проаналізуємо можливості віконного перетворення Фур'є.

Вікно можна задавати або вектором його коефіцієнтів або індексом для ряду заздалегідь визначених вікон, реалізованих у вигляді фільтра з КІХ:

- `rectanqular`;
- `tapreq rectanqular`;
- `trianqular`;
- `hanning`;
- `hamminq`;
- `blackman`.

Формула для такого перетворення

$$X(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int x(\tau) \cdot w(\tau - t) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (2.4)$$

для сигналу, який являє собою дві пачки синусоїдальних коливань з різною частотою [7].

На відміну від звичайного перетворення Фур'є функція $x(\tau)$ множиться на вікно $w(\tau - t)$, значення якого (у першому наближенні) рівний 1 в межах вікна і 0 за його межами. Це вікно переміщується вздовж часової осі без перекриття і спектр за методом Фур'є обчислюється в межах кожного вікна. Таким чином, отримуємо набір спектрограм в площині час-частота. З метою аналізу можливостей віконного перетворення імпульсних сигналів вібрацій зображених на рисунках 2.3, 2.8 та 2.10. Відповідні їм спектрограми зображені на рисунках 2.4, 2.6, 2.7, 2.9, 2.11. Спектрограми вимірювальних сигналів будуть представлені для вікон різної ширини.

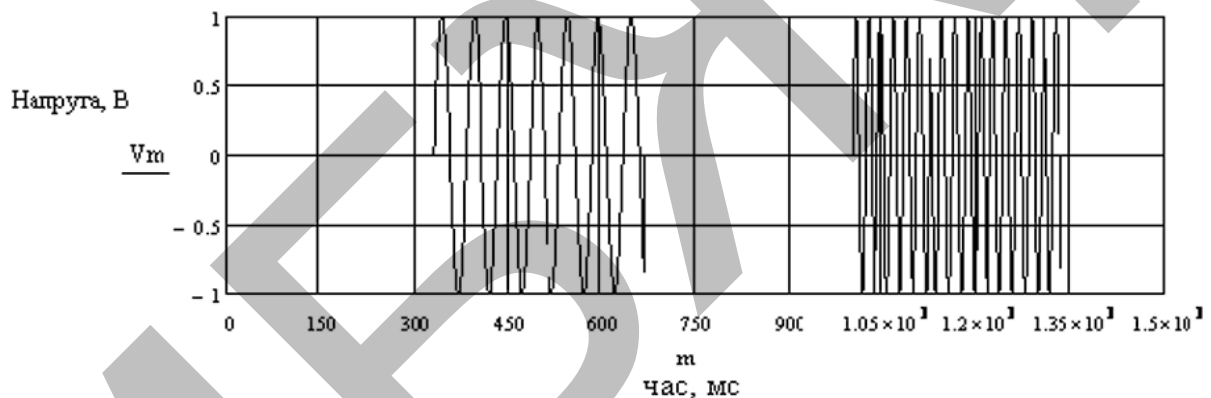


Рисунок 2.3 – Сигнали імпульсних вібрацій

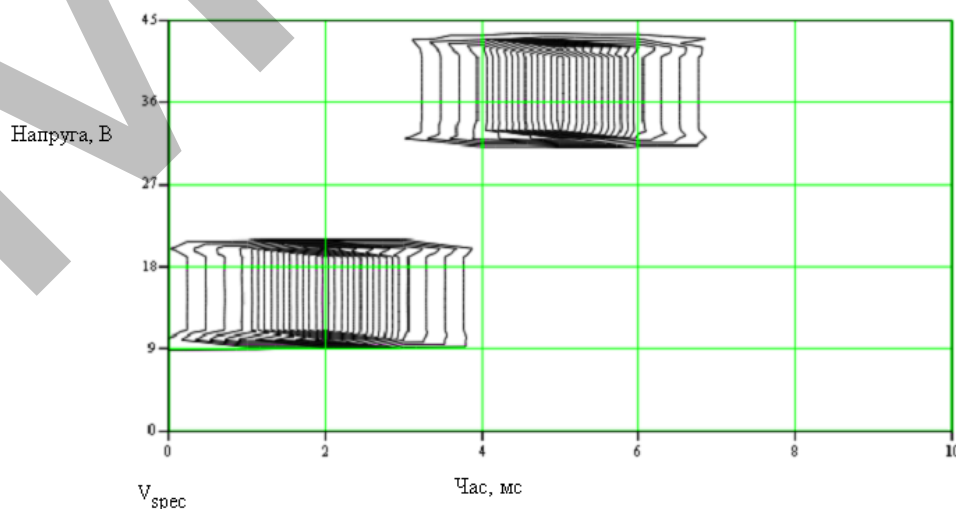


Рисунок 2.4 – Віконне перетворення Фур'є (розмір вікна – 100 відліків)

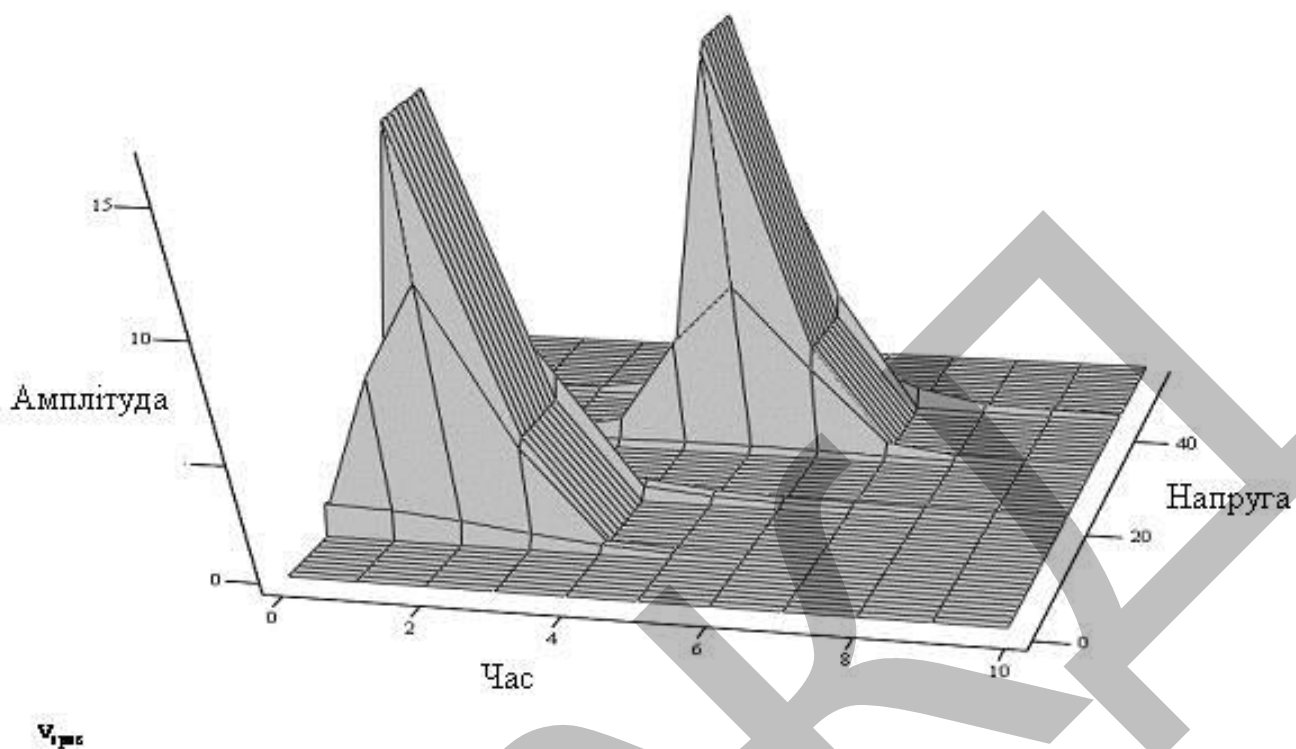


Рисунок 2.5 – Віконне перетворення Фур'є у просторі
(розмір вікна – 100 відліків)

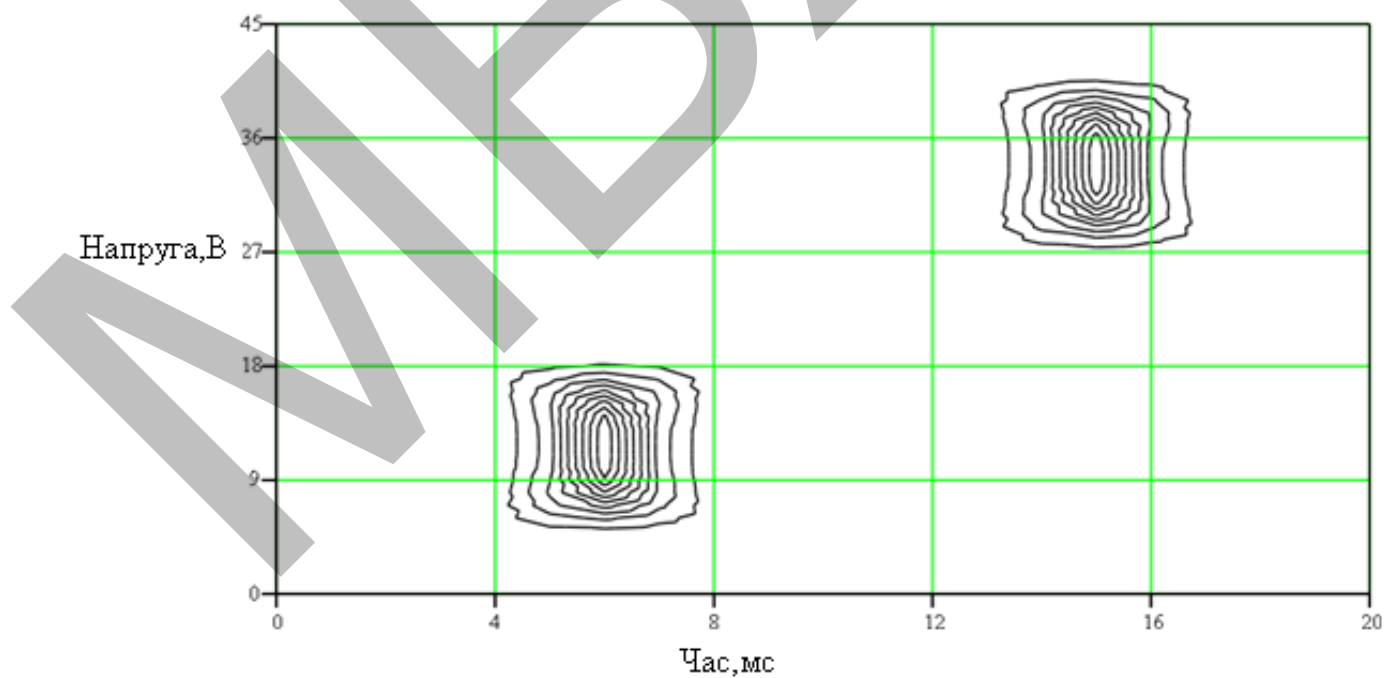


Рисунок 2.6 – Віконне перетворення Фур'є (розмір вікна – 300 відліків)

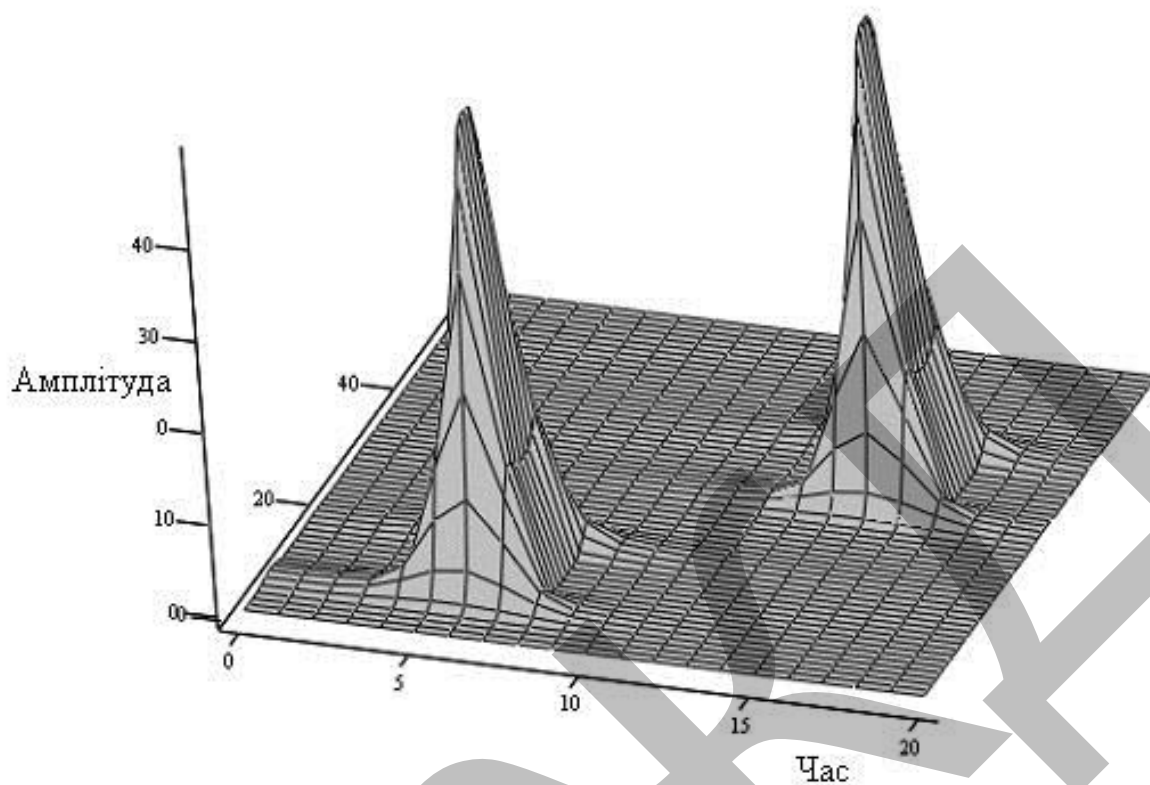


Рисунок 2.7- Віконне перетворення Фур'є у просторі (розмір вікна – 300 відліків)

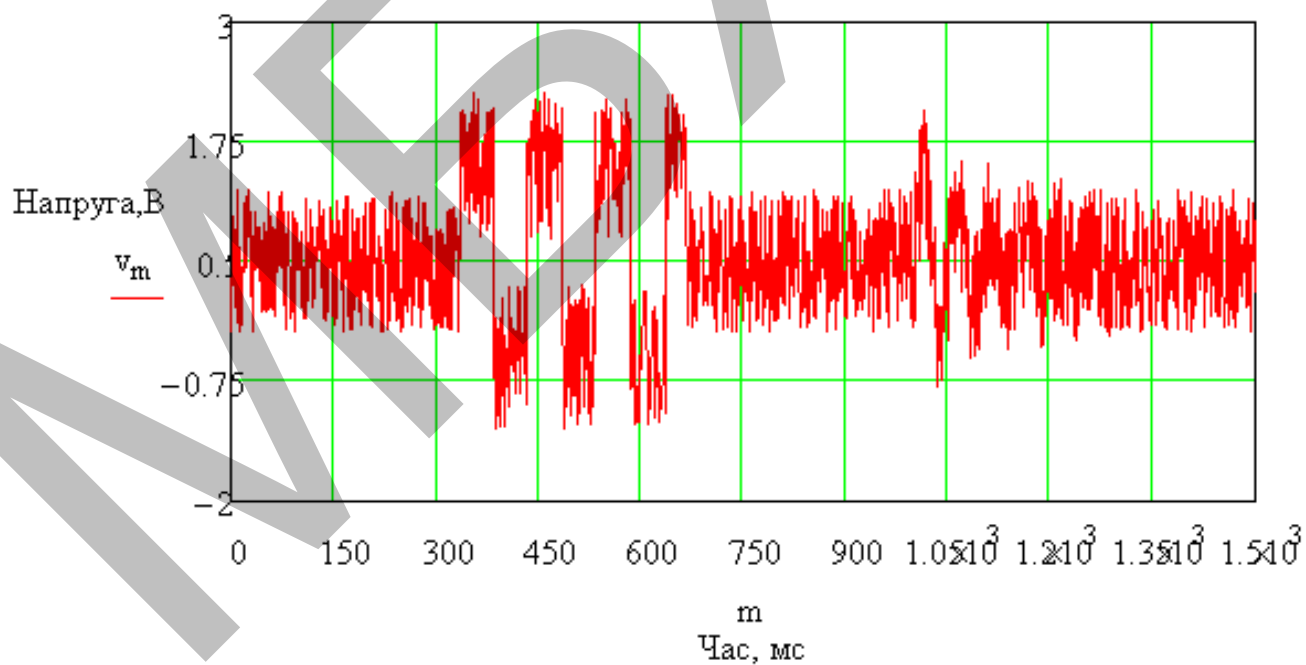


Рисунок 2.8 – Вимірний сигнал вібрацій

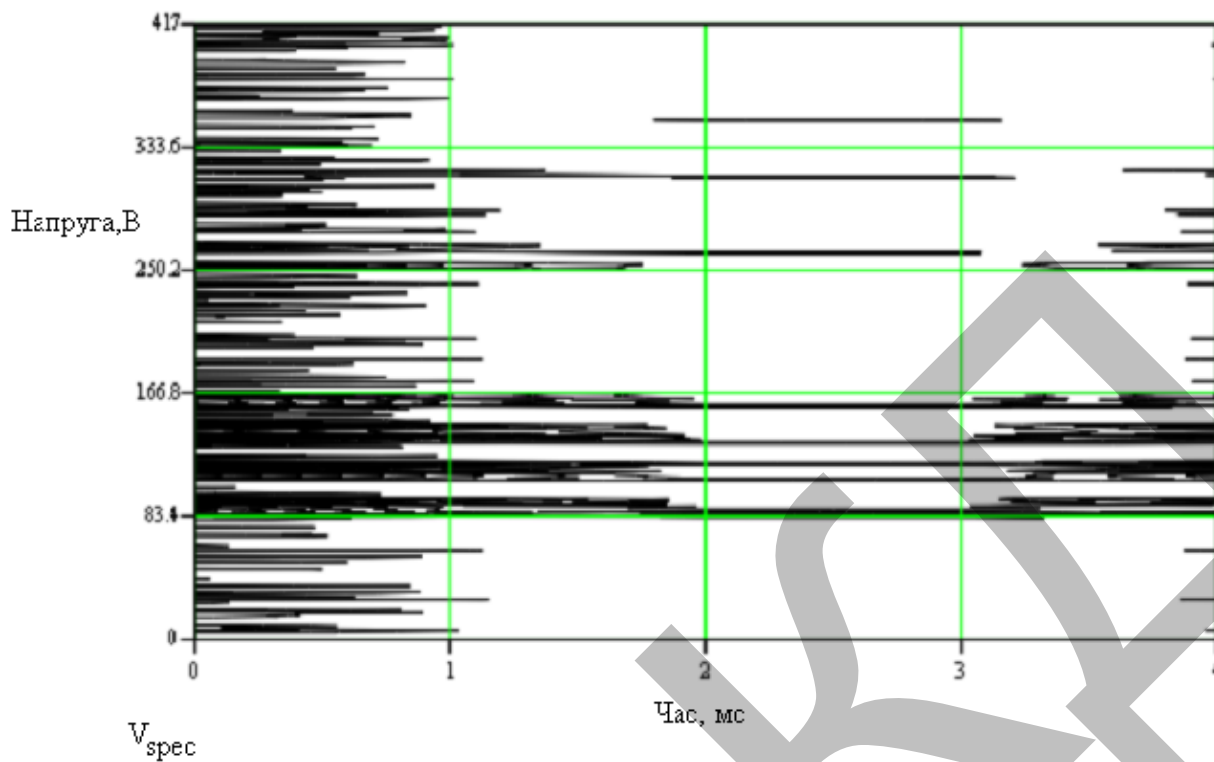


Рисунок 2.9 - Віконне перетворення Фур'є зашумленого сигналу

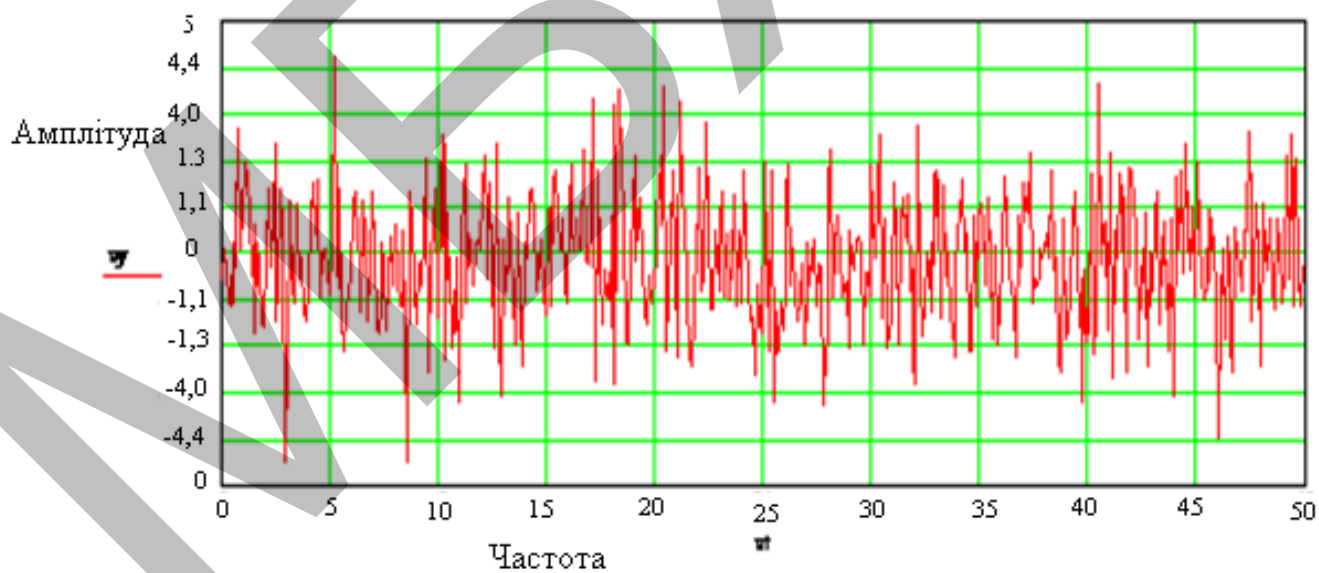


Рисунок 2.10 - Осцилограма сигналу, що має чотири косинусоїдальні компоненти з частотами 30, 20, 10 і 5 Гц

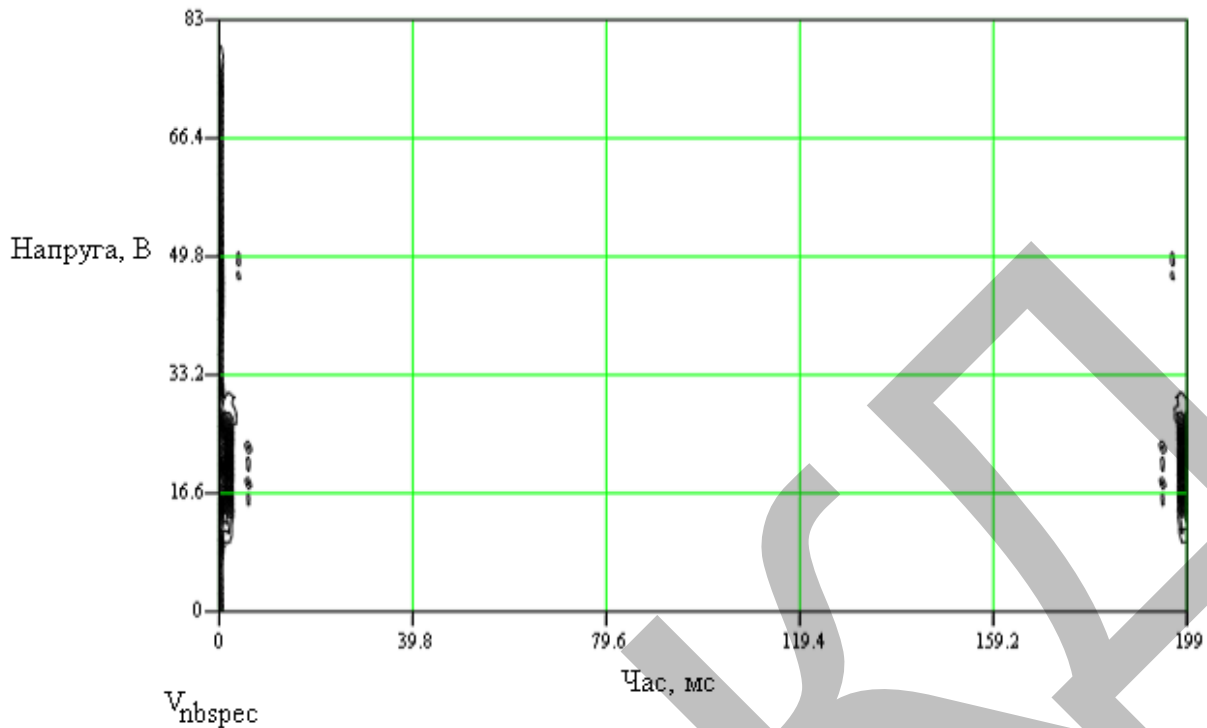


Рисунок 2.11 – Віконне перетворення Фур'є (розмір вікна – 5 відліків)

Реальний сигнал вібрації містить кілька частотних компонент, що кожна з компонент (починаючи з самої високочастотної) на інтервалі часу 1000 мс існує всього по 250 мс. Таким чином, переходимо від розгляду стаціонарного сигналу до розгляду не стаціонарного сигналу [6].

2.2 Методика вейвлет-аналізу вимірювальних сигналів вібрацій дорожніх машин

За результатами проведених експериментів з вимірювання параметрів вібрацій рами автогрейдера були отримані рівномірні часові ряди

$$x_k = x(t_k), \quad t_k = \Delta t \cdot k, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (2.5)$$

де $\Delta t = 1\text{с}$ – дискретність часової вибірки,

$N = 115256$ – число точок часового ряду.

Аналіз результатів вимірювань показав, що отримані експериментально вимірювальні сигнали мають закон розподілу близький до нормального. Виходячи з цього для виявлення вібрацій з певними частотами пропонується використовувати пороги. Оскільки ймовірність появи тих чи інших вібраційних сигналів різна, то для кожного окремого порога необхідно брати свій рівень значимості q . Рівень значимості $q \ll 1$ визначає ймовірність перевищення заданого порога нормованою скалограмою [2]. Критичний поріг для розділення шумової і детермінованої компоненти часового ряду T_q , який відповідає рівню значимості q визначається згідно із виразом:

$$T_q = -\ln q, \quad (2.6)$$

Вимірний сигнал можна представити як:

$$x_k = A_1 \cos(2\pi\nu_1 t_k - \varphi_1) + \sigma_n n_k, \quad (2.7)$$

де $t_k = \Delta t k, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

A_1, ν_1, φ_1 — амплітуда, частота та фаза гармонійної компоненти;

$n_k, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ — значення виміряного сигналу з нульовим математичним очікуванням та одиночною дисперсією, розподіленого за нормальним законом (шумова складова ряду);

σ_n — середньоквадратичне відхилення шумової компоненти n_k , заданого співвідношенням

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{A_1^2}{2\gamma}}, \quad (2.8)$$

де γ — відношення сигнал/шум.

В якості прикладу візьмемо часову вибірку виміряного сигналу вібрації з наступними параметрами:

$$\Delta t = 1\text{с}; N = 100; q = 0,01; A_1 = 1; \nu_1 = 0,1\text{Гц}; \varphi_1 = 0; \gamma = 0,5.$$

Методика спектрального аналізу полягає в наступному [5]:

1. Графічне зображення виміряного часового ряду вібрації в часовій області.

Зазвичай візуального вивчення графіка виміряного сигналу дозволяє виявити присутність в даних постійної складової, або низькочастотної компоненти (тренд). Хоча вейвлети мають нульові моменти і, як наслідок, ігнорують постійну складову, вони по відношенню до тренду такою властивістю володіють не завжди. Для вивчення високочастотних складових вібрацій обидві ці складові доцільно вилучити із даних.

2. Виключення тренду і центрування ряду.

Для виключення тренду необхідно задати його модель. Якщо природа тренду має теоретичне обґрунтування, то моделювання тренду здійснюється на основі цієї теорії. Частіше за все ми не знаємо природу тренду. В таких випадках в якості нормальної моделі використовують апроксимацію тренду за допомогою лінійної комбінації яких-небудь поліномів. При цьому в склад такого виразу входить і вільний член. Параметри взятої моделі тренду визначаються за допомогою методу найменших квадратів, а потім значення тренду віднімаються з вихідних даних [1, 2]. В найпростішому випадку така операція зводиться до виключення постійної складової (центрування часового ряду). При цьому середнє значення ряду визначається за формулою:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k, \quad (2.9)$$

а центрований ряд отримуємо з вихідного наступним чином:

$$x_k^\circ = x_k - m, k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (2.10)$$

3. Графічне зображення центрованого вимірюного ряду значень параметрів вібрацій.

4. Оцінка дисперсії центрованого ряду.

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^\circ)^2. \quad (2.11)$$

Перед виконанням вейвлет-аналізу корисно провести попередні вивчення часового ряду за допомогою Фур'є перетворення. Якщо це не потрібно, то можна відразу перейти до пункту 7.

5. Обчислення періодограми. Тут приводиться спрощений варіант Фур'є аналізу нашого ряду без використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Спочатку обчислюють дискретне перетворення Фур'є

$$X_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k^\circ e^{-i\frac{2\pi}{N}kj}, \quad j = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (2.12)$$

після чого обчислюється періодограма

$$D_j = \frac{1}{N^2} \left[(\operatorname{Re} X_j)^2 + (\operatorname{Im} X_j)^2 \right], \quad j = 0, 1, \dots, N/2, \quad (2.13)$$

де $\Delta\nu = \frac{1}{T\Delta t}$.

6. Графічне зображення періодограми і порога виявлення сигналу вібрацій [15].

Цей графік дозволяє порівняти значимі спектральні лінії. Для цього потрібно задати рівень значимості $q \ll 1$ і визначити відповідний йому поріг виявлення сигналу. Якщо нам не відомі періоди, присутні в даних, то застосовується критерій,

заснований на статистиці розподілу найбільшого відліку періодограми «білого» шуму:

$$X_q = -\ln[1 - \sqrt[N-2]{(1-q)^2}]. \quad (2.14)$$

Якщо, навпаки, частота гармонійного коливання нам відома, то

$$X_q = -\ln q. \quad (2.15)$$

Всі піки періодограми, які перевищують критичний рівень $\frac{\sigma_0^2 X_q}{N}$, приймаються за значимі, тобто належать до термінованого компоненту ряду. Ймовірність такого твердження рівна $1 - q$.

7. Дискретизація аргументів.

Кожний вейвлет має свою форму і характерний розмір, який при фіксованому значенні масштабного коефіцієнту визначається величиною

$$d_a = 2\Delta_t a, \quad (2.16)$$

де Δ_t - радіус вейвлета.

Функція $W_A(a, b)$ визначає кореляцію між аналізуючим предметом, який знаходиться в точці b , і будь-якою деталлю часового ряду розмірів d_a з центром в точці b . Модуль цієї функції приймає найбільше значення в тому випадку, коли розмір вейвлета співпадає з розміром деталі часового ряду в заданий момент часу [5, 6].

У випадку полігармонійної функції мірою масштабу її деталей є період гармонійних компонентів, міра протяжності вейвлету d_a визначається значенням масштабного коефіцієнту a . Для полігармонійної функції, заданої на сітці з кроком $\Delta t = const$, діапазон періодів гармонік визначається величинами $P_{min} = 2\Delta t$ і $P_{max} = (N - 1)\Delta t$. У відповідності з цим виберемо найбільше і найменше значення масштабного коефіцієнта із умови відповідності розмірів вейвлета і граничних періодів гармонійних компонент:

$$2\Delta_t a_{min} = P_{min}, \quad 2\Delta_t a_{max} = P_{max}, \quad (2.17)$$

звідси отримуємо

$$a_{min} = \frac{\Delta t}{\Delta_t}, \quad a_{max} = \frac{(N-1)\Delta t}{2\Delta_t}. \quad (2.18)$$

Для вейвлетів Морле ці формули будуть мати вид:

$$a_{min} = \frac{2\Delta t}{\alpha}, \quad a_{max} = \frac{(N-1)\Delta t}{\alpha}. \quad (2.19)$$

Відзначимо, що ці значення беруться в тих випадках коли необхідно виконати аналіз часового ряду в повному діапазоні масштабів. Введемо тепер крок дискретизації масштабів:

$$\Delta a = \frac{a_{max} - a_{min}}{N_a - 1}. \quad (2.20)$$

Після чого назначимо дискретні значення масштабних коефіцієнтів наступним чином:

$$a_i = a_{min} + \Delta a i, \quad i = 0, 1, \dots, N_a - 1. \quad (2.21)$$

Оскільки ширина спектральної лінії збільшується з ростом масштабу, то іноді значення параметра a представляють у логарифмічному масштабі.

Тепер розглянемо способи дискретизації параметра b [5]. У спрощеному випадку границі діапазону переміщень назначаються наступним чином:

$$b_{min} \geq 0; \quad b_{max} \leq (N - 1)\Delta t, \quad (2.22)$$

після чого дискретні значення зрушень можна визначити за формулою:

$$b_j = b_{min} + \Delta b j, j = 0, 1, \dots, N_b - 1, \quad (2.23)$$

де N_b - прийняте число вузлів сітки, наступних один за одним з постійним кроком

$$\Delta b = \frac{b_{max} - b_{min}}{N_b - 1}. \quad (2.24)$$

Зрозуміло, що при такому способі дискретизації параметра b поблизу меж b_{min} і b_{max} величини $W_A(a_i b_j)$ будуть обчислюватися з похибками, так як біля меж неможливо використовувати усю довжину аналізуючого вейвлету.

Для виключення граничних ефектів слід визначити вейвлет-перетворення тільки для значень переміщення, віддалених від меж на величину, рівну поточному радіусу $a\Delta t$. При такому підході маємо:

$$b_j = b_{min} + \Delta b j, j = J_a^* + 1, \dots, N_b - J_a^* - 1, \quad (2.25)$$

де J_a^* відображений у одиницях Δb радіус вейвлета, відповідний поточному значенню масштабу a :

$$J_a^* = \left[\frac{a_i \alpha}{2\Delta b} \right]. \quad (2.26)$$

В цій формулі квадратними дужками позначена операція округлення до найближчого цілого [5].

Множина вузлів дискретної сітки, позначена формулами (2.20) і (2.24), називається трикутником достовірності. Відзначимо, що дуже часто краєві ефекти ігноруються і результати вейвлет-перетворення представляють просто у прямокутній області вузлів.

8. Обчислення вейвлет-перетворення.

Дискретні значення амплітудної вейвлет функції обчислюються за наступними виразами:

$$W_A(a_i b_j) = \frac{1}{n(a_i b_j)} \sum_{k=0}^{N-1} x_k^\circ \psi^* \left(\frac{t_k - b_j}{a_i} \right), \quad (2.27)$$

$$n(a_i b_j) = \sum_{k=0}^{N-1} \exp \left(\frac{1}{B} \left(\frac{t_k - b_j}{a_i} \right)^2 \right). \quad (2.28)$$

В цих виразах ψ_t - прийнятий аналізуючий вейвлет. Подальший розвиток методики ґрунтується на використанні вейвлету Морле з параметрами α^2 :

$$\psi_t = e^{-t^2/\alpha^2} e^{i2\pi t}, \quad (2.29)$$

в такому випадку $B = \alpha^2$.

9. Обчислення скалограми. Значення скалограми для всіх прийнятих вузлів сітки проводиться за формулою

$$S(a_i, b_j) = |W_A(a_i, b_j)|^2. \quad (2.30)$$

10. Візуалізація скалограми.

Значення скалограми $S(a_i, b_j)$ лежать на поверхні, для зображення якої використовують два основні способи:

1. Представлення поверхні в тривимірному просторі координат (a, b, S) . Програмні пакети MATHCAD, SURFER, Python та інші дозволяють побудувати такі графіки відтворити їх в будь-якому ступені розвороту і нахилу системи координат (наприклад, опція Surface пакету Surfer32);

2. Плоске зображення поверхні $S(a_i, b_j)$ у координатах (a, b) у вигляді топографічної карти. Масштаб третього вимірювання вказується або оцифруванням ізоліній, або розфарбовуванням областей між ізолініями. При цьому градації кольору або послідовність різних кольорів оцифровуються за допомогою спеціальної кольорової палітри, що є додатком до графіка вейвлета (наприклад, опції Contour і Image пакету Surfer32).

11. Обчислення скелетона.

Буває так, що широкі контури лінії близьких по частоті гармонік заважають простежити за еволюцією їх частот в часі. Щоб відсікти вплив контурів, можна виділити ті точки скалограми, в яких вона має максимуми по змінних a і b :

$$S_c(a_i, b_j) = \begin{cases} S_{ij}, & \text{якщо } S_{i-1,j} < S_{ij} > S_{i+1,j} \\ & \text{або } S_{i,j-1} < S_{ij} > S_{i,j+1}, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.31)$$

Цю функцію ми називатимемо скелетомом. У разі синусоїдального сигналу точки скелетона розташовуються уздовж ліній, що йдуть паралельно осі часу. Якщо в даних є гармонійні або квазігармонійні компоненти, то топологічна карта скелетона складатиметься з ліній, орієнтованих уздовж осі b . У разі шумового компоненту лінії скелетона витягуються в перпендикулярному напрямі, тобто паралельно осі a . Якщо в даних присутні і гармонійні компоненти, і шум, то карта скелетона дозволяє бачити їх роздільно [5, 6].

12. Виділення сигналу з шуму.

Критерій виділення сигналу з шуму дозволяє побудувати масив значень скалограми, які із заданою вірогідністю $1 - q$ належать сигнальному, а не шумовому компоненту:

$$S_q(a_i, b_j) = \begin{cases} S_c(a_i, b_j), & S_c(a_i, b_j) \geq \sigma_0^2 Z(a_i, b_j) T_q \\ 0, & S_c(a_i, b_j) < \sigma_0^2 Z(a_i, b_j) T_q \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\text{де } Z(a_i, b_j) = \frac{1}{n^2(a_i, b_j)} \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(-\frac{2}{\alpha^2} \frac{t_k - b_j}{a_i}\right). \quad (2.33)$$

Іноді буває доцільно виділяти сигнал не з самої скалограми, а з її скелетона. В цьому випадку в праву частину формули замість величини $S(a_i, b_j)$ слідче підставити $S_c(a_i, b_j)$.

13. Обчислення скалограми [5].

Ця функція обчислюється за формулою:

$$G_i = \frac{1}{N_b - 2J_a^*} \sum_{j=J_a^*}^{N_b - J_a^* - 1} S(a_i, b_j), \quad i = 0, \dots, N_a - 1, \quad (2.34)$$

де J_a^* - задається формулою, якщо обчислення ведуться в трикутнику достовірності. Інакше слід покласти $J_a^* = 0$.

2.3 Висновки до розділу

Таким чином встановлено, що істотним недоліком спектрів, отриманих при звичайному перетворенні Фур'є, є їх мала інформативність. Локальні особливості сигналів, наприклад короткі сплески чи провали, розриви і сходинки і т. д. ведуть до появи в спектрі вищих гармонік з малою амплітудою, розмазаних по всій частотній осі. Визначити за ними характер локальних особливостей досить важко. Одним з напрямків вирішення цього завдання криється в застосуванні вейвлет-перетворень.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙ РАМИ АВТОГРЕЙДЕРА З ВИКОРИСТАННЯМ ЧАС-ЧАСТОТНОГО АНАЛІЗУ

Для обґрунтування необхідності підвищення точності вимірювання частоти вібрацій використовувались дані експериментальних досліджень, які були проведені Ковалем А. О., Ковалем О. А., Резніковим О. О. у 2010 році на полігоні механічного факультету ХНАДУ. В експериментах використовувалось наступне обладнання [1,2]:

- автогрейдер ДЗк-250В (рисунок 3.1);
- інформаційно-вимірювальна система відповідно до методики вимірювань параметрів вібрацій ДМ в різних динамічних режимах роботи (рисунок 3.2).



Рисунок 3.1 - Автогрейдер ДЗк 250В

Основні дослідження проводились в наступних режимах ДМ:

- а) транспортний;
- б) слабо навантажений режим;

- в) середньо навантажений режим;
- г) сильно навантажений режим.

При слабкій загрузці грейдер працював на піщаному ґрунті. Ступінь навантаженості робочого органу складав від 15 % до 20 %.

Режим середньої нагрзуки властивий тим, що робота грейдера проводилася на глиняному сухому ґрунті, нагрзука складала до 40 %.

В сильно навантаженому режимі роботи на змішаному кам'яному ґрунті (пісок з глиною і каменями), при цьому режимі нагрзука на робочий орган складала (80 – 100) %.

В процесі експериментальних досліджень швидкість руху автогрейдера вибиралася наступним чином [2, 3]:

- незалежно від режиму нагрзуки швидкість руху складала 3 км/год;
- швидкість вибиралася в відповідності з режимом нагрзуки:
 - а) слабо навантажений режим 5 км/год;
 - б) режим середньої нагрзуки 3 км/год;
 - в) сильно навантажений режим 1 км/год.

Для досліджень використовувалась інформаційно-вимірювальна система, яка наведена на рисунок 3.2. [1].

Як видно зі схеми, інформаційно-вимірювальна система має в своєму складі датчик температури, датчик тиску, датчик кількості обертів, датчик вібрацій двигуна, датчик вібрації робочого органу, датчики вібрації рами, датчик деформації, акселерометр, 10 канальний 16-ти розрядний АЦП, ноутбук. Розглянемо призначення кожного компоненту більш детально.

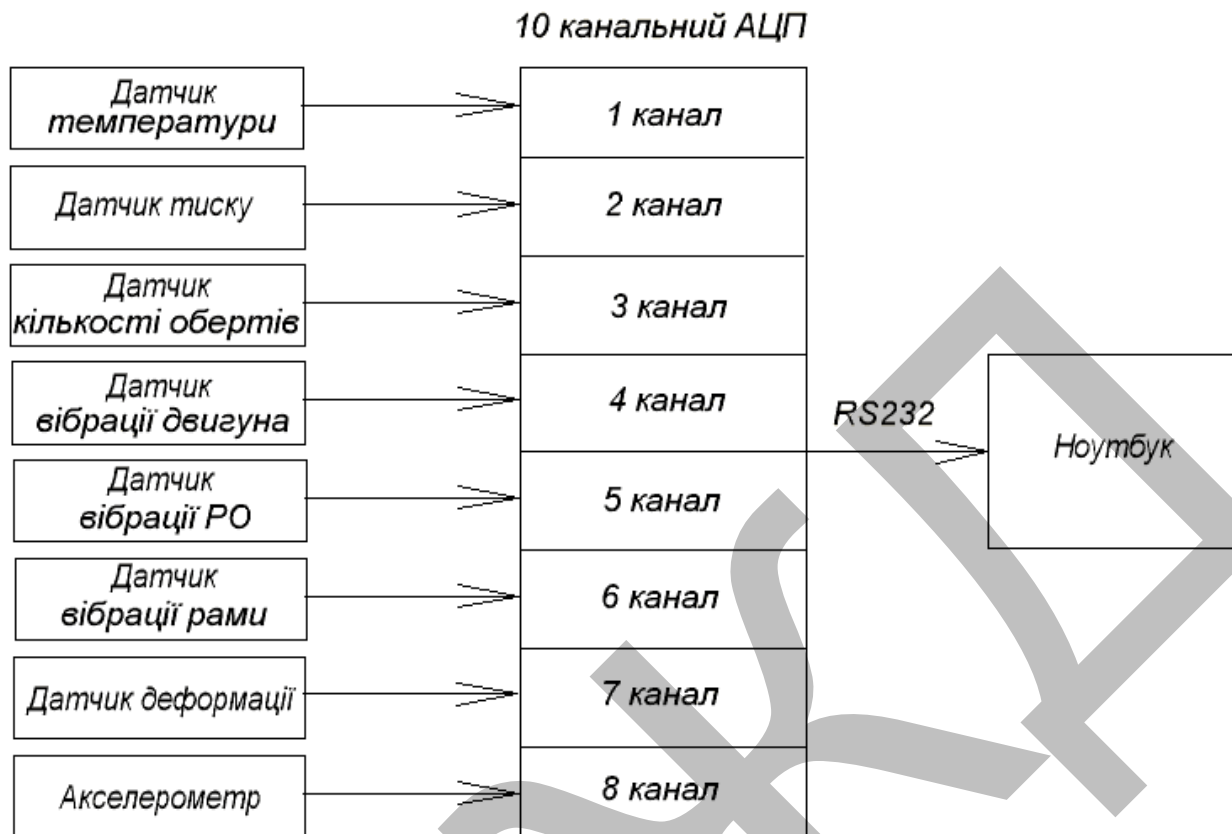


Рисунок 3.2 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи

В якості датчиків вібрації використовувались тензодатчики, які встановлювались на раму та робочий орган автогрейдера. Акселерометр є чутливим елементом системи, який фіксує зміни швидкості машини. Для вимірювання рівнів тиску використовувався електричний датчик тиску [1, 2]. В якості датчика деформації використовувалися тензодатчики.

Перетворення неелектричних інформативних параметрів датчиків, підключених до входів вимірювальних каналів, у цифрову форму здійснюється за допомогою АЦП, результати якого обробляються мікропроцесорними обчислювальними пристроями для одержання результатів вимірювань у бінарному виді. В подальшому інформація оброблялася в блоці аналізу ноутбука з використанням пакету LabView отримані результати обробки виводились на монітор ноутбука та роздруковувались на принтері.

3.1 Дослідження параметрів вібрацій конструктивних елементів автогрейдера

Вимірювальна інформація, отримана за результатами експериментальних досліджень характеризується:

- а) великим числом вхідних і вихідних параметрів;
- б) взаємною залежністю вимірювальних параметрів;
- в) низьким ступенем упорядкованості вхідного потоку вимірювальної інформації;
- г) малим часом, наданим експериментаторові для вимірювання і оцінки отриманих даних на кожній ступені вимірювання;
- д) наявністю неконтрольованих збурювань (погрішності вимірювань, особливості поведінки конструкції при експериментах);
- є) необхідністю оцінки вірогідності наданої експериментаторові інформації.

Результати обробки отриманих сигналів вібрацій на рисунках 3.3 – 3.8.

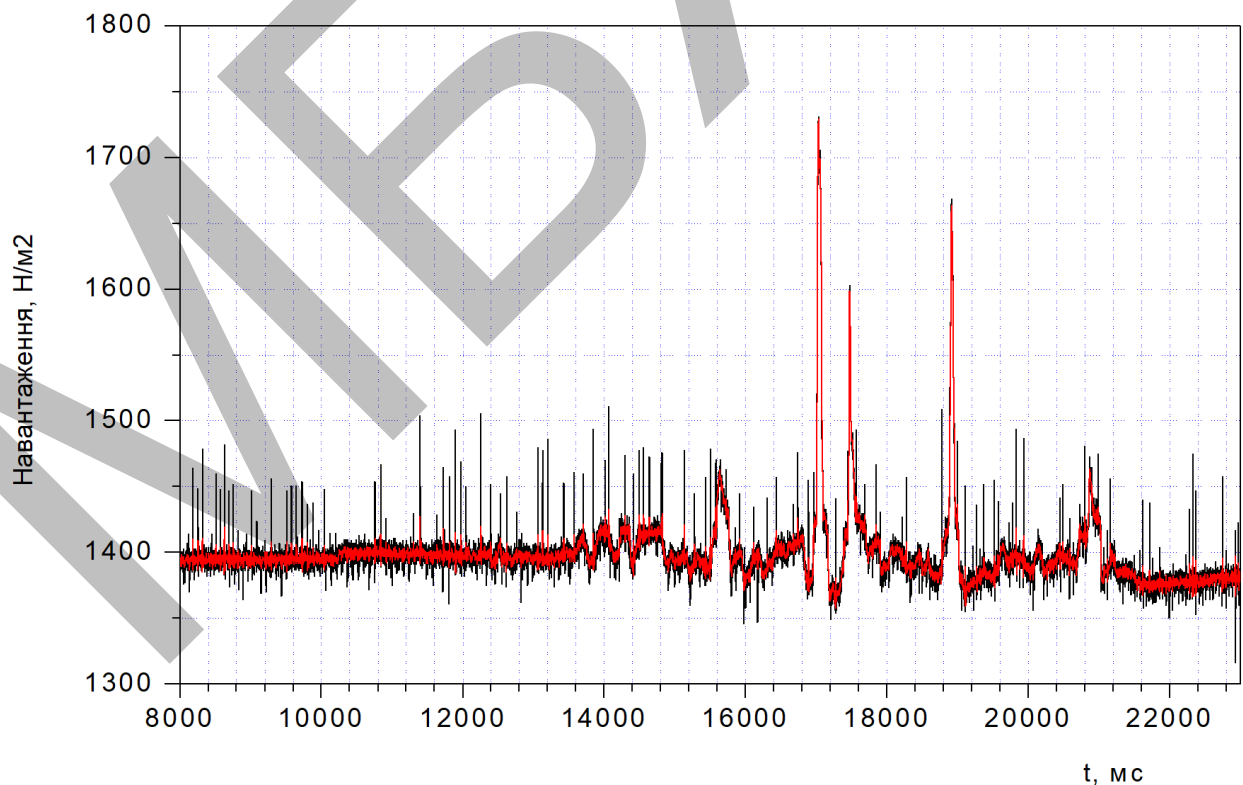


Рисунок 3.3 – Вібрації рами в слабо навантаженому режимі

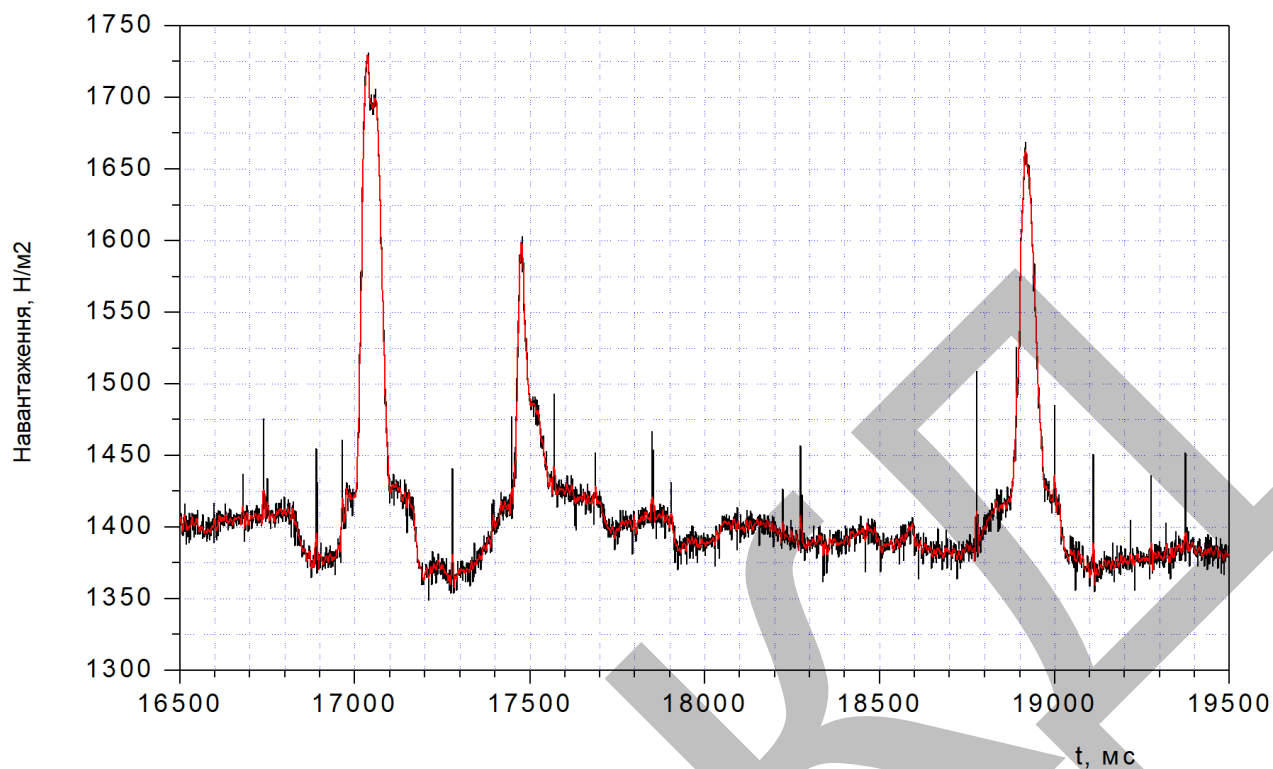


Рисунок 3.4 – Вібрації рами в слабо навантаженому режимі (пік нагрздки)

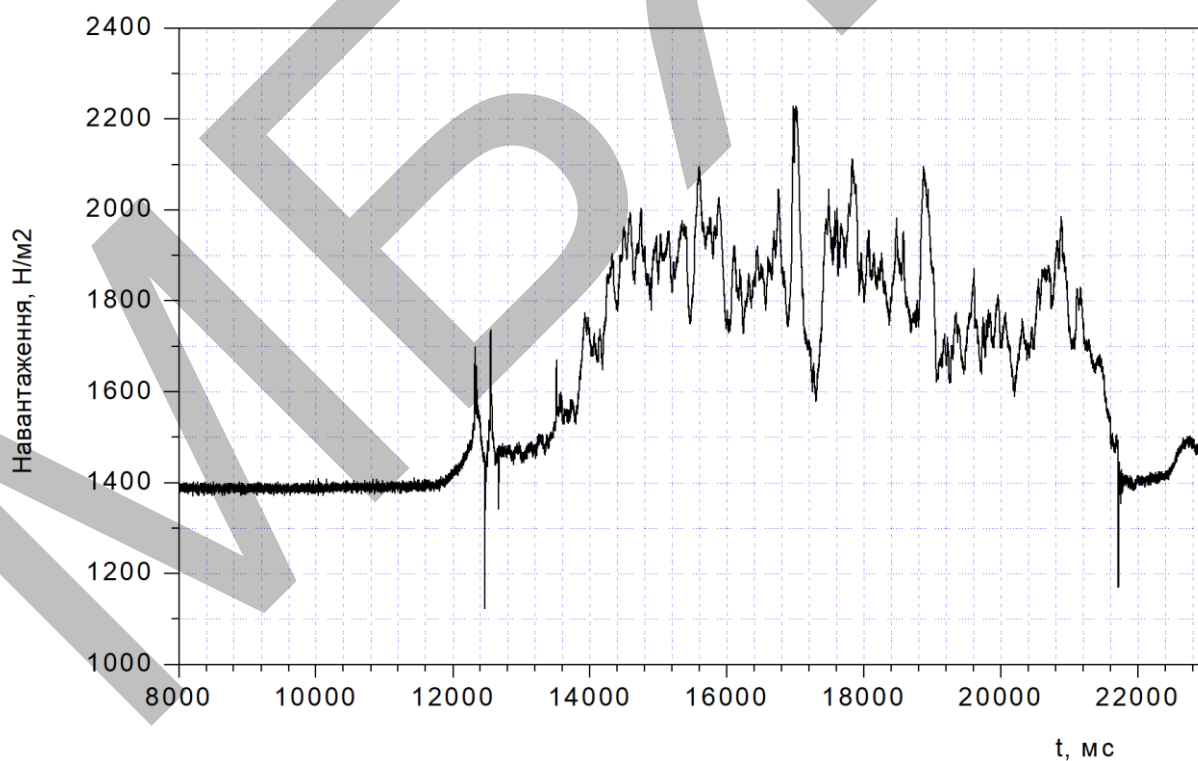


Рисунок 3.5 – Вібрації рами в середньо навантаженому режимі
(мокра глина)

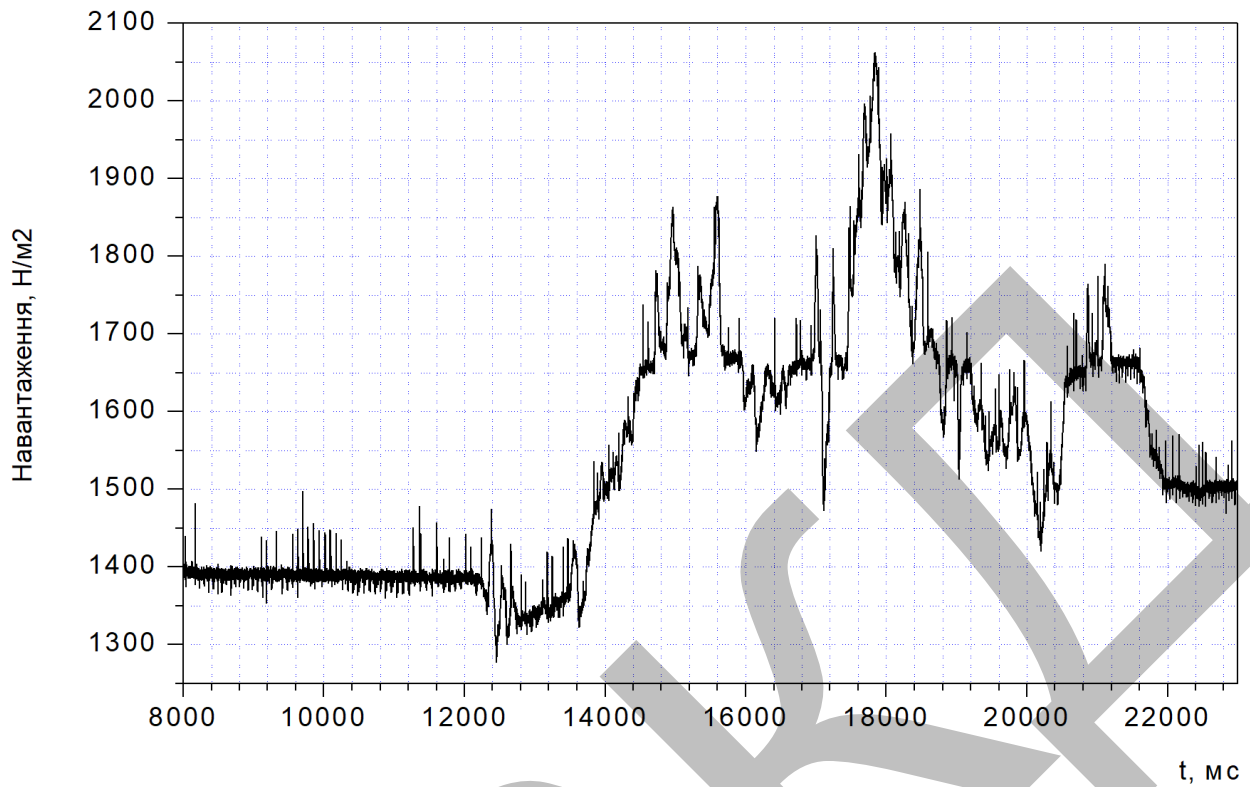


Рисунок 3.6 – Вібрації рами в середньо навантаженому режимі
(сухий ґрунт)

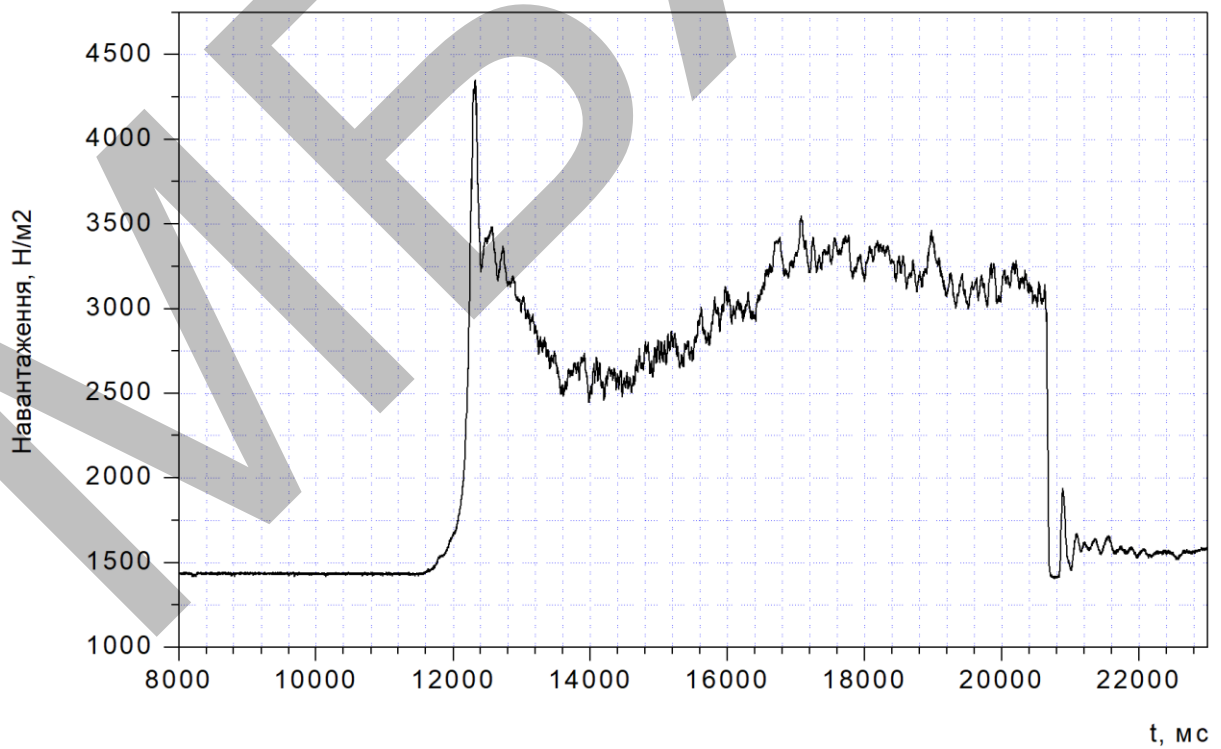


Рисунок 3.7 - Вібрації рами в сильно навантаженому режимі
(великий масив глини із щебенем)

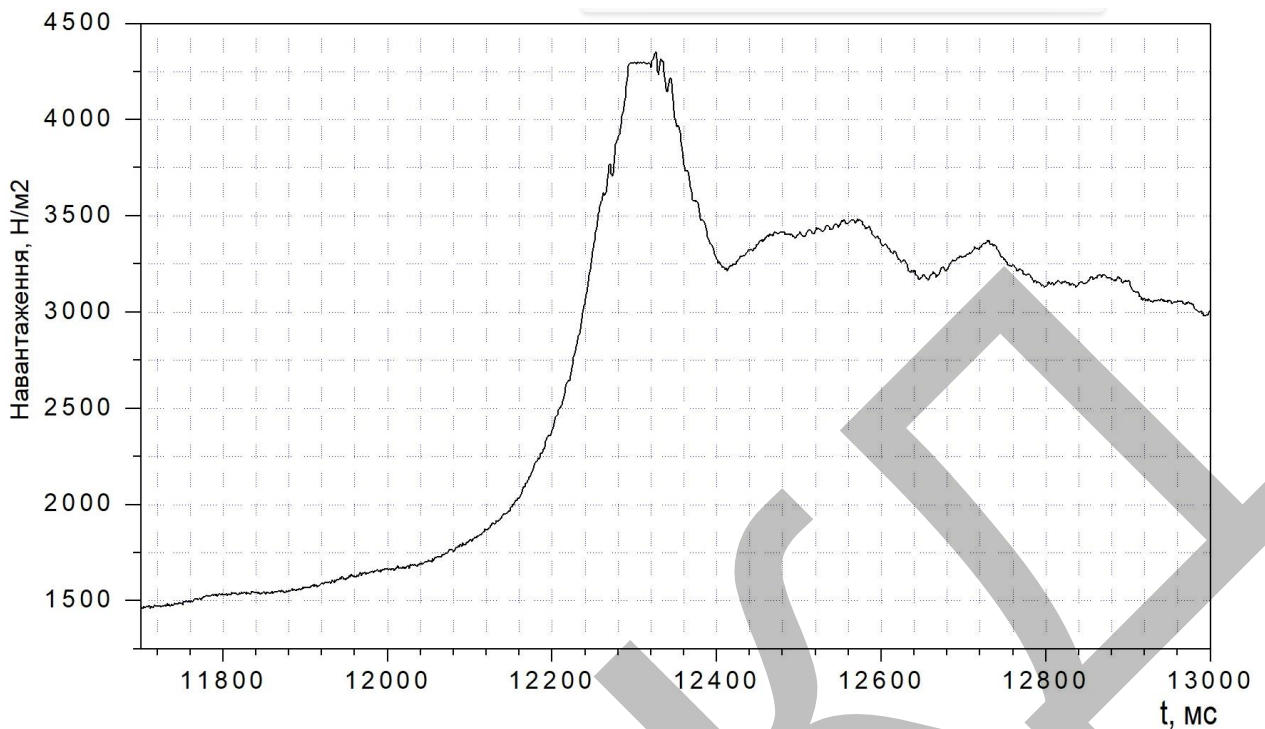


Рисунок 3.8 - Вібрації рами в сильно навантаженому режимі (пік нагрзуки)

Аналіз даних вимірювань вібрацій свідчать про наступне:

1. Динамічні навантаження, які діють на автогрейдер носять стохастичний характер.

2. Не залежно від режиму роботи автогрейдера мають місце коливання всієї динамічної системи с періодом від 500 мс до 800 мс, частота вібрацій лежить в межах від 2 Гц до 1,25 Гц. Ці коливання приводять до вібрацій рами автогрейдера [1]. Поряд с цим є також і вібрації робочого органу, вони міняються в залежності від режиму роботи і становлять:

- а) для слабо навантаженого режиму – 10 Гц;
- б) для середньо навантаженого режиму – 7 Гц;
- в) для сильно навантаженого режиму – 5 Гц.

Таким чином, як показали результати експериментальних досліджень, період коливань динамічних нагрузок на робочий орган лежить в межах від 200 до 100 мс (від 5 Гц до 10 Гц). Ці коливання в свою чергу, незалежно від режиму роботи, передаються на раму автогрейдера і в ній виникають коливання більш нижчої частоти – від 0,001 Гц до 1,25 Гц.

Поряд з вище сказаним слід відмітити те, що результати вимірювання параметрів вібрацій рами автогрейдера та робочих органів в значній мірі залежали як від місця установки датчиків так і від їх типу.

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що аналогові п'єзоелектричні та механічні акселерометри мають досить низьку чутливість і не дозволяють вимірювати параметри вібрацій рами автогрейдера. Так їхня нижня гранична частота вимірювань становить (в залежності від типу та модифікації) від 10 Гц до 20 Гц. Також внаслідок їх інерційності неможливо вимірювати скачки періоду вібрацій рами і робочих органів автогрейдера. Таким чином така вимірювальна інформація не є достовірною.

Подальший порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних вимірювання параметрів вібрацій рами автогрейдера показав, що спочатку тензодатчиками фіксувались коливання деформацій, а лише через 200 мс спрацьовували акселерометри. Це свідчить про те, що джерелом вібрацій рами автогрейдера є насамперед упорядкований хаотичний характер зміни динамічних нагрузок на робочі органи та раму автогрейдера. Під їх дією в рамі виникають коливання деформацій, а це призводить до виникнення вібрацій. Тому з метою ранньої діагностики рами автогрейдера було прийнята в якості вихідної, вимірювальна інформація тензодатчиків [3, 4]. Величина вібрації рами, амплітуда та період коливання вібрацій рами автогрейдера в значній мірі залежить від режиму роботи дорожньої машини (величини динамічних нагрузок) і місця розташування тензодатчиків на рамі автогрейдера.

3.2 Алгоритм вейвлет-аналізу вимірювальних часових вибірок

З метою підвищення достовірності та точності амплітуди та частоти вібрацій рами та робочих органів автогрейдера на основі методики вейвлет-аналізу часових рядів був розроблений та апробований алгоритм вейвлет-аналізу вимірювальних часових вибірок.

Основними завданнями запропонованого алгоритму (рисунок 3.9) є:

— знаходження кореляційних зв'язків між вхідним вимірним часовим рядом вібрацій рами автогрейдера та вейвлетом Морле:

1. Проведення тотожності значимих спектральних ліній для заданого рівня значимості $q \ll 1$.
2. Виявити сигнали вібрацій які перевищують заданий поріг виявлення.

Структурна схема алгоритму приведена на рисунку 3.9.

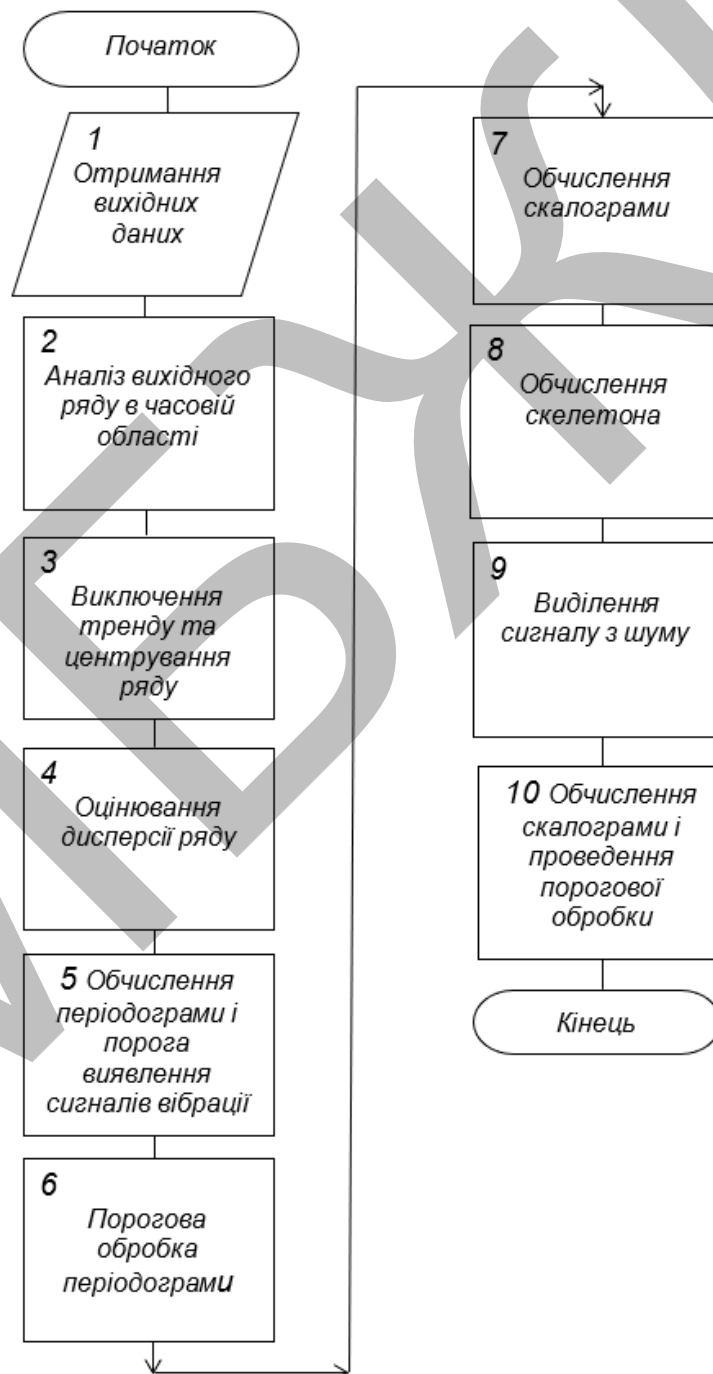


Рисунок 3.9 – Алгоритм вейвлет-аналізу вимірювальних часових вибірок.

Даний алгоритм був апробований з використанням студентської (free) версії MathCAD 11.

Отримані результати приведені на рисунках 3.10 – 3.16. Аналіз отриманих результатів показує, що при наявності відношення сигнал / шум = 4 запропонований алгоритм з вірогідністю $P = 0,9$ дозволяє виявити сигнали вібрації (рисунки 3.13, 3.16).

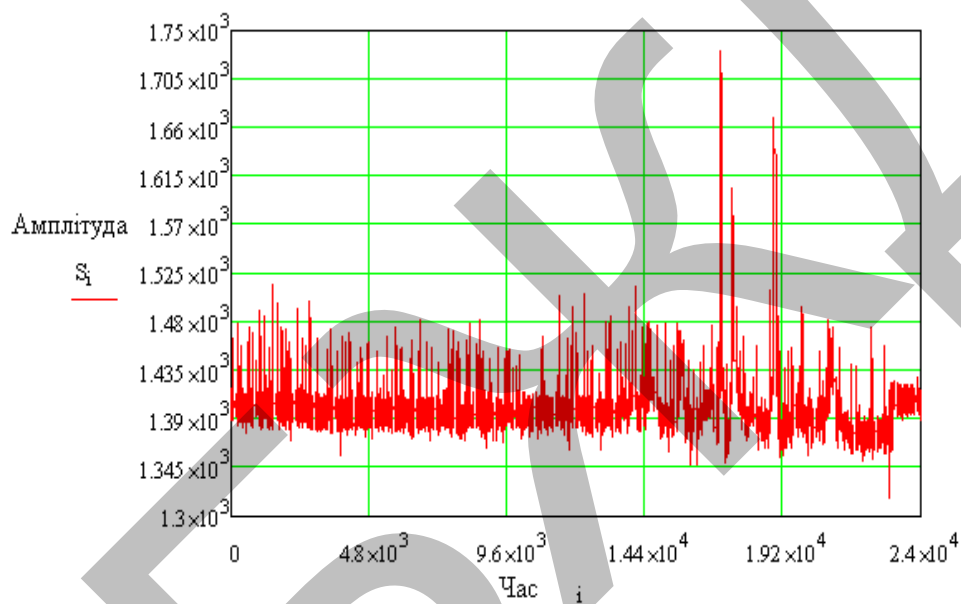


Рисунок 3.10 – Вхідний часовий ряд вібрацій

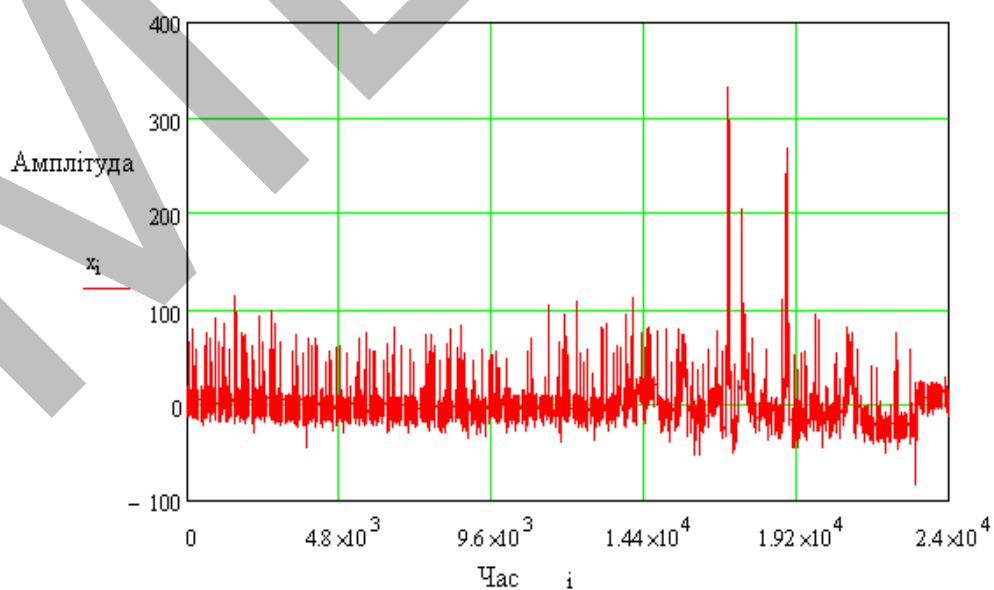


Рисунок 3.11 – Центрований часовий ряд вібрацій

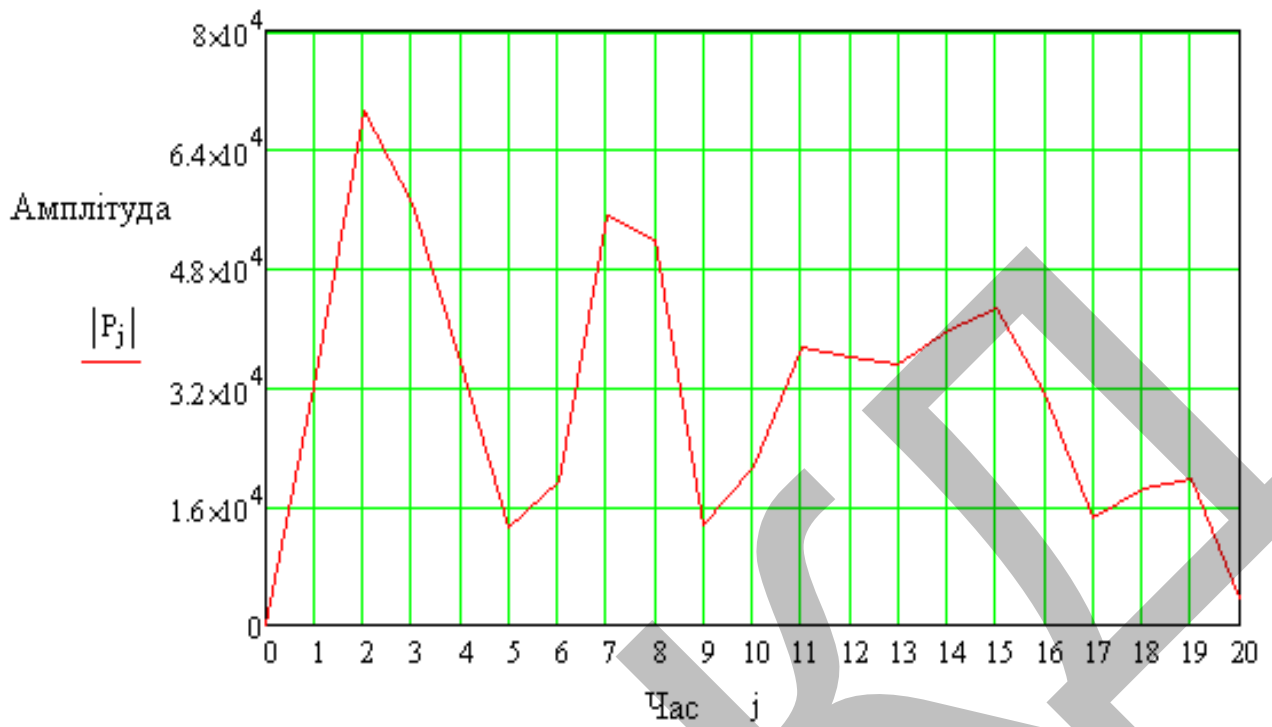


Рисунок 3.12 – Періодограма виміряного ряду

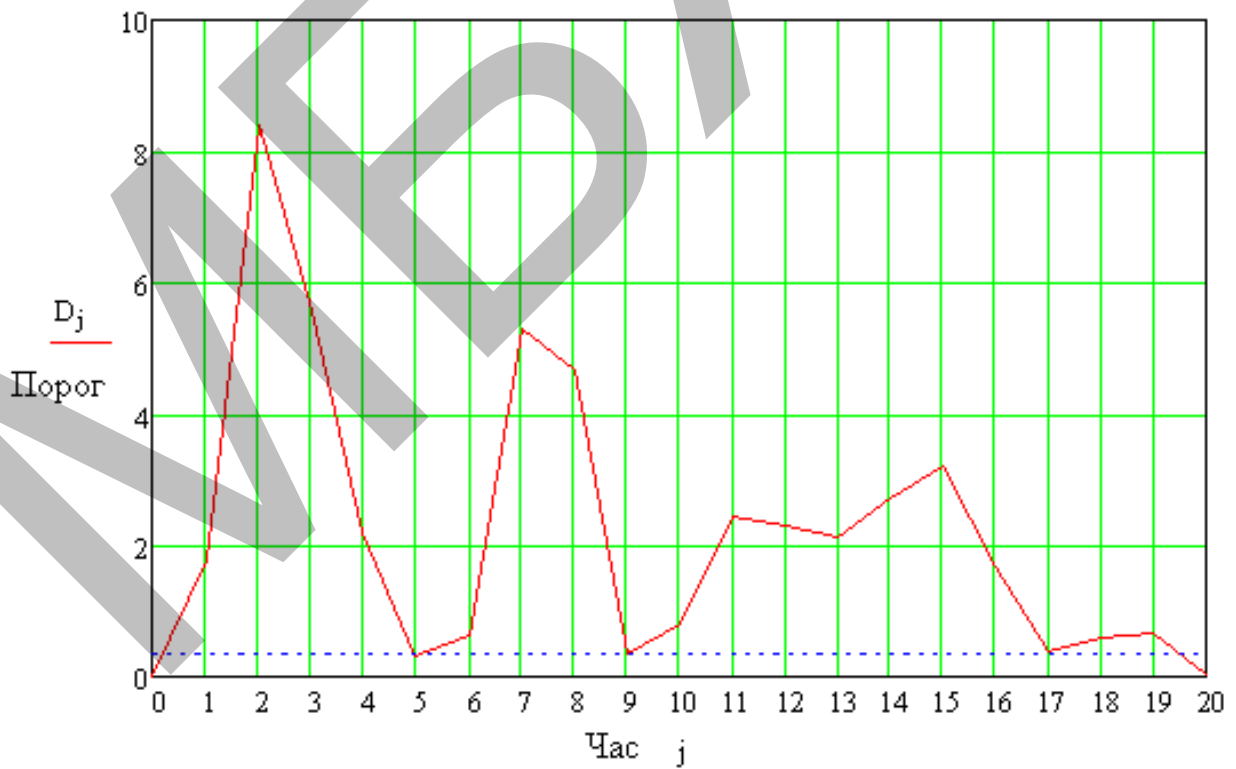


Рисунок 3.13 – Результати порогової обробки періодограми

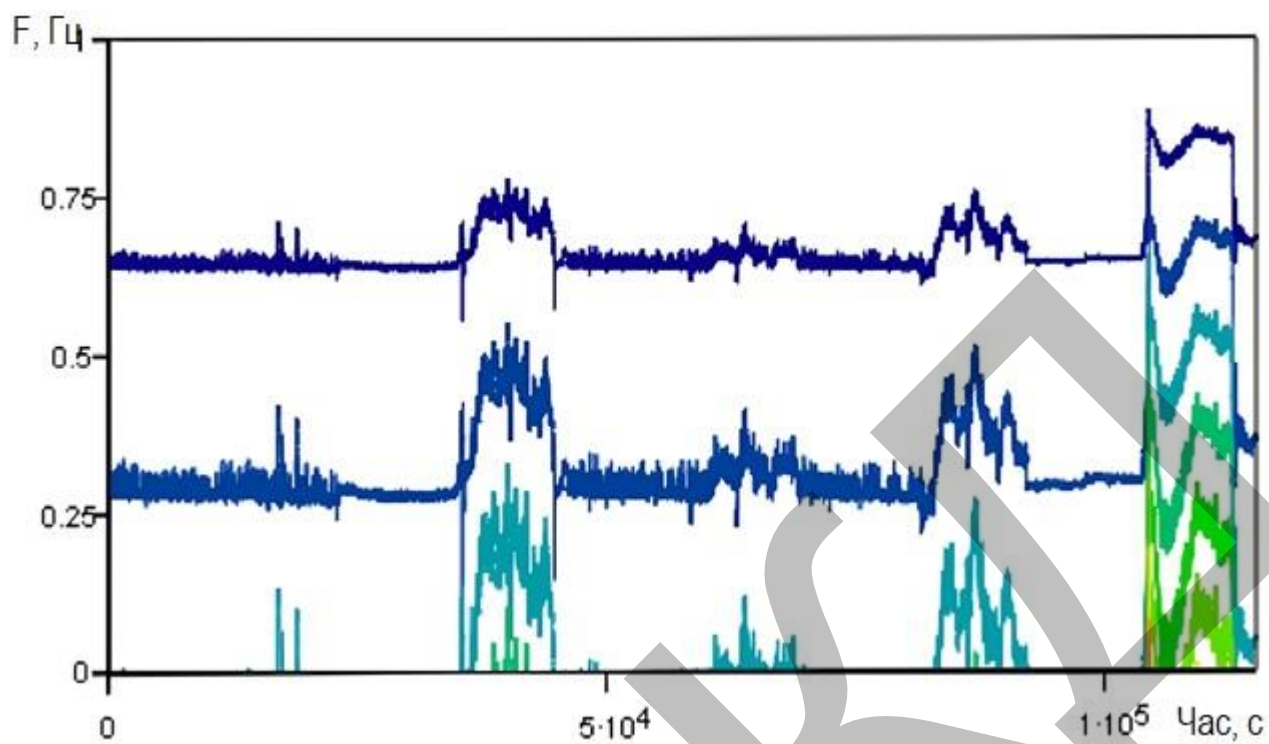


Рисунок 3.14 – Скалограма часового ряду вібрацій

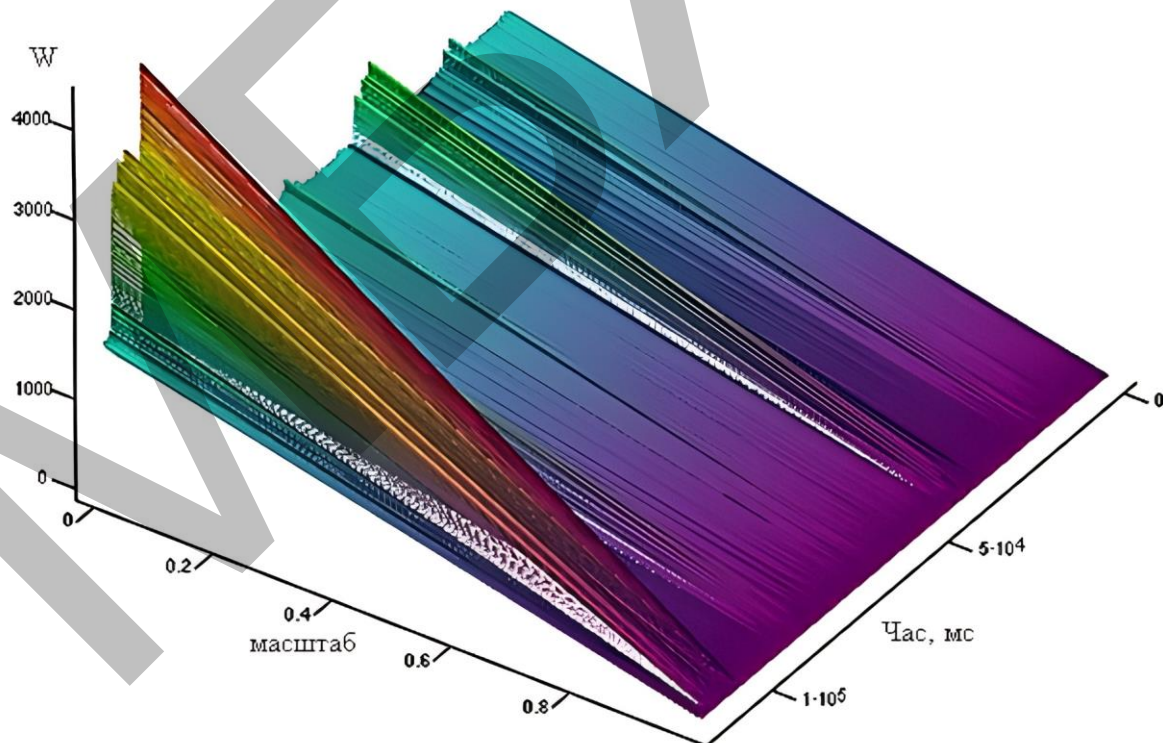


Рисунок 3.15 – 3D зображення скалограми сигналу вібрацій

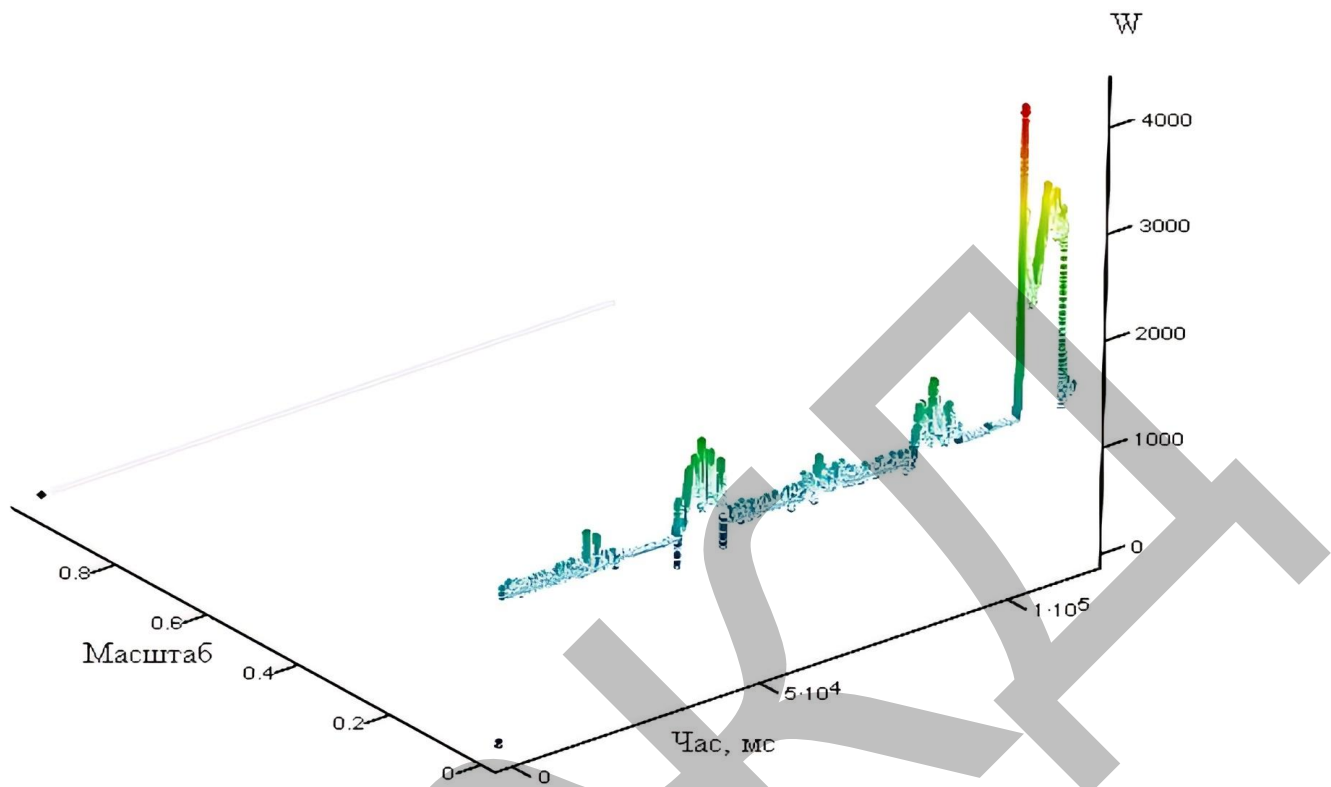


Рисунок 3.16 – Результат виділення сигналу скалограми із шуму за результатами порогової обробки

3.3 Висновки до розділу

В результаті застосування час-частотного методу з використанням вейвлет-аналізу вирішена задача детального спектрального аналізу сигналів вібрації конструкції дорожньої машини.

Використання порогової обробки при реалізації методу вейвлет-аналізу вібраційних сигналів дозволило підвищити ймовірність правильного вимірювання складових спектру до 0,9.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ І НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Згідно ст.1 Закону України «Про охорону праці» під охороною праці розуміється система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів направлених на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [8].

Задачі охорони праці в Україні визначає система правових і нормативно-технічних документів. До перших відносяться Конституція України, закони про працю, організаційно-методичні документи по охороні праці. До другої групи відносяться система стандартів безпеки праці, міжгалузеві стандарти, будівельні норми і правила, санітарні норми, правила пристрою електроустановок і інші.

Управління охороною праці спрямована на реалізацію положень Конституції та Законів України щодо забезпечення охорони життя й здоров'я працівників у процесі трудової діяльності, створення безпечних і нешкідливих умов праці на кожному робочому місці, належних умов для формування у працівників свідомого ставлення до особистої безпеки та безпеки оточуючих, запровадження нових і вдосконалення існуючих механізмів управління в галузі охорони праці.

Управління охороною праці – це підготовка, прийняття та реалізація правових, організаційних, науково-технічних, санітарно-гігієнічних, соціально-економічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі трудової діяльності.

Розділ розроблено для робочого місця оператора, який використовує комп'ютер для збирання та обробки вимірювальної інформації. .

На функціональний стан людини впливають фізичні чинники виробничого процесу, до яких належать: психофізіологічні та емоційні перенапруження, втома, стрес тощо. Усі вони нормуються згідно з «Державними санітарними правилами і нормами роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» ДСТУ ISO 9241-3, ДСТУ ISO 9241-2, ДСТУ ISO 9241-5, ДСТУ ISO 9241-6, ДСТУ ISO 9241-7, ДСТУ ISO 9241-9 Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі [9], які поширюються на умови та організацію

праці при роботі з візуальними дисплейними терміналами усіх типів вітчизняного та зарубіжного виробництва на основі електронно-променевої трубок, що використовуються в комп'ютері колективного та персонального використання.

Допустимі рівні напруженості електромагнітного поля радіочастотного діапазону регламентуються 10.ДСанПіН 3.3.6.096-2002. У зв'язку з тим, що ПК є джерелом тепловиділень, у приміщенні може підвищитися температура повітря і знизитися відносна вологість повітря приміщення [10].

Нормована освітленість на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має бути від 300 лк до 500 лк [11].

Для створення комфортних умов праці, запобігання втомленості очей і професійним захворюванням освітлення повинно:

- відповідати нормованим значенням освітленості на кожному робочому місці;
- бути рівномірним і постійним;
- не створювати тіней;
- не засліплювати;
- зменшувати до мінімуму стробоскопічний ефект;
- дотримувати необхідний контраст об'єктів і фону на екрані відеотерміналу;
- забезпечуватися правильно підібраними світильниками;
- уникати відблисків на екрані;
- передбачати заходи для обмеження осліплювальної дії вікон, прямих сонячних променів з метою вимкнення на робочих поверхнях яскравих і темних плям, засвічування екрана;
- зменшувати тепловий ефект від інсоляції.

Рівень шуму, згідно з ДСН 3.3.6.037 [12], на робочих місцях не повинен перевищувати 50 дБ, що досягається застосуванням Малошумного обладнання, використанням спеціальних матеріалів для обшивання приміщень, а також різноманітними звукопоглинальними пристроями (перегородки, кожухи, прокладки тощо).

Для запобігання впливу шуму навколишнього середовища (ззовні) приміщення з комп'ютер повинен облицьовуватися звукопоглинальними матеріалами, що мають максимальний коефіцієнт звукопоглинання.

Приміщення, де експлуатуються комп'ютер, належать до приміщень без підвищеної небезпеки ураження людини електричним струмом.

Необхідно забезпечити неможливість виникнення джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів шляхом переходу на негорючу ізоляцію.

Будівлі і ті їх частини, в яких розташовуються ПК, мають бути не нижче за II ступінь вогнестійкості. Над і під приміщеннями, де розташовуються ПК, а також в суміжних з ними приміщеннях не вирішується розташування приміщень категорій А і Б по вибухопожежній небезпеці. Приміщення категорії В необхідно відокремлювати від приміщень з ПК протипожежними стінами.

Для всіх споруд і приміщень, в яких експлуатуються відеотермінали і комп'ютери, має бути визначена категорія по вибухопожежній і пожежній небезпеці згідно ДСТУ Б В.1.1-36 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою» [12], і клас зони згідно НАПБ А.01.001 «Правила пожежної безпеки в Україні» [13].

Відповідні позначення мають бути нанесені на вхідні двері приміщення.

Підлога в приміщеннях з комп'ютером має бути виготовлений з негорючих матеріалів (або трудногорючих з межею вогнестійкості не менше 0,5 год.). Простір під знімною підлогою розділяють негорючими діафрагмами на відсіки площею не більше 250 м². Межа вогнестійкості діафрагми має бути не менше 0,75 год. Комунікації прокладають крізь діафрагми в спеціальних обоймах із застосуванням негорючих ущільнювачів для запобігання проникненню вогню з одного відсіку в іншій, а також з підпільного простору в приміщення. Підпільний простір під знімною підлогою мають бути оснащений системою автоматичної пожежної сигналізації і засобами пожежогасіння згідно вимогам Переліку однотипних за призначенням об'єктів, які підлягають устаткуванню автоматичними установками пожежогасіння і пожежної сигналізації [13].

Приміщення, в яких розташовуються ПК і дисплейні зали, мають бути оснащені системою автоматичної пожежної сигналізації з димовими пожежними сигналізаторами і переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку 2 шт. на кожні 20 м² площі приміщення з урахуванням граничних допустимих концентрацій вогнегасної речовини.

Не рідше за один раз на квартал необхідно очищати від пилу агрегати і вузли, кабельні канали і простір між підлогами.

Організація пожежної охорони. Відповідальність за пожежну безпеку покладена на ректора університету. Він, у свою чергу, призначає відповідальних за пожежну безпеку окремих служб, відділів, складів і інших службових приміщень з покладанням на них обов'язків за спостереженням за справним станом первинних засобів пожежогасіння, дотриманням протипожежного режиму, виконанням протипожежних заходів.

Пожежно-технічна комісія не рідше 1 разу на місяць зобов'язана проводити ретельне обстеження по дотриманню протипожежного режиму у всіх виробничих і службових приміщеннях. Вона повинна контролювати виконання розпоряджень Держпраці і витрата відпущених на ці заходи засобів.

Наявність струмоведучих частин, які можуть піддаватися гасінню, висуває певні вимоги до засобів пожежогасіння (мати діелектричні властивості). Як первинні засоби пожежогасіння, в такому разі, можна використовувати пінні вогнегасники марки ОХП-10, які придатні для гасіння струмоведучих елементів і хімічно малоактивні. Вогнегасники ОХП-10 дають струмінь довжиною до 8 метрів протягом 60 секунд і розраховані на покриття 50 м² площі приміщення .

Розрахуємо струм, що проходить через тіло людини при однополюсному та двополюсному дотиканню до трифазної мережі змінного струму частотою 50 Гц. Опір ізоляції дротів $R_{I3}=300$ кОм. Приміщення сухе, людина знаходиться на сухій підлозі. Опір людини $R_{ЛЮД}=1,5$ кОм. Опір заземлення нейтралі $R_0=4$ Ом [14].

Розглянемо трифазну мережу з глухо заземленою нейтраллю. При однополюсному дотиканні можливі два варіанти: людина дотикається до нульового проводу та людина дотикається до фазного проводу. Розглянемо перший варіант. В

цьому випадку струм через тіло людини не проходить ($I_{\text{люди}}=0$) і таке дотикання безпечне для людини.

Тепер розглянемо другий варіант. В даному випадку струм через тіло людини визначається за формулою:

$$I_{\text{люди}} = \frac{U_{\phi}}{R_0 + R_{\text{підлоги}} + R_{\text{взуття}} + R_{\text{люди}}}, \quad (4.1)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга (в нашому випадку 220В);

R_0 – опір заземлення нейтралі;

$R_{\text{підлоги}}$ – опір підлоги;

$R_{\text{взуття}}$ – Опір взуття.

Для сухої підлоги, вкритої лінолеумом при відносній вологості приміщення від 50% до 60% опір приймаємо рівним $R_{\text{підлоги}} = 1500 \text{ кОм}$.

Для шкіряної підшви в сухому приміщенні опір взуття приймаємо рівним $R_{\text{взуття}} = 100 \text{ кОм}$.

Визначимо величину струму:

$$I_{\text{люди}} = \frac{220}{4 + 1500 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3 + 1.5 \cdot 10^3} = 0.1 \text{ мА}.$$

Таке значення струму (0,1 мА) при частоті 50 Гц нижче за пороговий відчутний струм для людини (від 0,6 мА до 1,5 мА).

Тепер розглянемо двополюсне дотикання. При двополюсному дотиканні також можливі два варіанти: людина дотикається до нульового проводу та до фазного проводу і людина дотикається до двох фазних проводів.

Розглянемо перший варіант. В цьому випадку струм через тіло людини знаходиться за формулою:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{люд}}} = \frac{220}{1.5 \cdot 10^3} = 0.146 \text{ А.} \quad (4.2)$$

Таке значення струму з частотою 50 Гц є смертельним для людини. При цьому відбувається миттєва зупинка серця, а також параліч дихання.

Розглянемо другий варіант В цьому випадку струм через тіло людини знаходиться за формулою:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\text{ЛНН}}}{R_{\text{люд}}}, \quad (4.3)$$

де $U_{\text{ЛНН}}$ – лінійна напруга (в нашому випадку 380 В).

Підрахуємо значення струму:

$$I_{\text{люд}} = \frac{380}{1.5 \cdot 10^3} = 0.253 \text{ А.}$$

Таке значення струму є смертельним для людини. У випадку, якщо дія струму була короткострокова (від 1 с до 2 с) та не визвало пошкодження серця, то після відключення струму серце, як правило, самостійно відновлює нормальну діяльність.

Тепер розглянемо трифазну мережу з ізолюваною нейтраллю. При однополюсному (однофазному) дотиканні значення струму, що проходить через тіло людини залежить від опору ізоляції та ємності відносно землі C . Якщо ємність мережі незначна ($C \approx 0$), то формула для розрахунку струму, що проходить через тіло людини має вигляд:

$$I = \frac{3 \cdot U_{\text{ЛНН}}}{3 \cdot (R_{\text{підлоги}} + R_{\text{взуття}} + R_{\text{людини}}) + R_{\text{ІЗ}}}, \quad (4.4)$$

де $R_{\text{ІЗ}}$ – опір ізоляції дротів (в нашому випадку $R_{\text{ІЗ}}=300$ кОм).

Визначимо величину струму:

$$I = \frac{3 \cdot 380}{3 \cdot (1500 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3 + 1.5 \cdot 10^3) + 300 \cdot 10^3} = 0.2 \text{ мА.}$$

Таке значення струму (0,2 мА) при частоті 50 Гц нижче за пороговий відчутний струм для людини (від 0,6 мА до 1,5 мА) і є невідчутним.

При двохполюсному (двохфазному) дотиканні значення струму, що проходить через тіло людини визначається за формулою:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\text{лн}}}{R_{\text{люд}}} \quad (4.5)$$

Знаходимо значення струму:

$$I_{\text{люд}} = \frac{380}{1.5 \cdot 10^3} = 0.253 \text{ А.}$$

Таке значення струму є смертельним для людини.

Проведемо розрахунок для освітлення на робочому місці (рисунок 4.1). Для цього будемо застосовувати крапковий метод розрахунку. Крапковий метод застосовується для розрахунку висвітлення: горизонтальних рівномірно і нерівномірно освітлених поверхонь, вертикальних і похилих поверхонь, місцевого висвітлення. Крім того, він застосовується для перевірки результатів, отриманих методів питомої потужності і методом коефіцієнта використання світлового потоку.

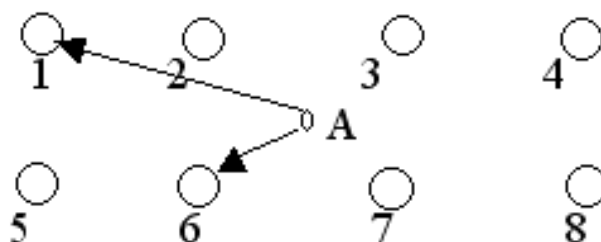


Рисунок 4.1 – Схема розташування світильників у лабораторії

Перевірити освітленість у точці А, робоче місце висвітлюється світильниками ОД із двома лампами ЛД-80 (люмінесцентне освітлення). Висота підвісу світильника 3,0 м, відстань від точки А до світильників 2, 3, 6, 7 дорівнює 2,0 м; відстань від точки А до світильників 1, 5, 4, 8 дорівнює відповідно 2 м та 2,5 м.

Поведемо розрахунок освітленості від точки А до світильників 2, 3, 6:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{H_{\Pi}}, \quad (4.6)$$

де d – відстань від розрахункової точки;

H_{Π} – висота підвісу світильника.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{3,0} = 0,66.$$

Кут падіння світлового променя А від світильників 2, 3, 6, 7 дорівнює

$$\alpha = 33^{\circ}; \quad \cos^3 \alpha = 0,59; \quad J_a = 198,$$

де J_a – сила світла лампи, кД.

Умовна освітленість дії світильника відповідно до формули

$$e_{\Gamma} = \frac{J_a \cos^3 \alpha}{H_{\Pi}^2}, \quad (4.7)$$

$$e_{\Gamma} = \frac{198 \cdot 0,59}{3^2} = 12,9.$$

Проведемо розрахунок освітленості в крапці А від світильників 1, 4, 5, 8

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2,5}{3} = 0,83.$$

Кут падіння світлового променя А від світильників 1, 4, 5, 8 дорівнює:

$$\alpha = 39^0; \cos^3 \alpha = 0,46; J_a = 157 \text{ кД},$$

$$e_r = \frac{157 \cdot 0,46}{3^2} = 8,02.$$

Сумарна умовна освітленість від врахованих світильників складе:

$$\sum e_r = 4 \cdot 12,9 + 4 \cdot 8,02 = 83,6,$$

де μ - коефіцієнт додаткової освітленості, $\mu = 1,15$;

K – коефіцієнт запасу;

Φ – світловий потік лампи, $\Phi = 5220 \text{ лм}$.

Одержуємо фактичну горизонтальну освітленість у точці А

$$E_r = \frac{2 \cdot \Phi \cdot \mu \cdot \sum e}{1000 \cdot K}, \quad (4.8)$$

$$E_r = \frac{2 \cdot 3000 \cdot 1,15 \cdot 83,6}{1000 \cdot 1,5} = 384.$$

4.1 Висновки до розділу

В результаті аналізу робочих місць оператора виявлені небезпечні, шкідливі фактори та приведені міри по їх усуненню, це дозволить покращити умови праці на робочому місці, покращити працездатність, попередити травмування¹ на робочому місці.

Зроблені певні розрахунки по кондиціонування повітря дозволяють автоматично підтримувати в приміщенні температуру, вологість, швидкість руху і чистоту повітря, тим самим створювати ефективну роботу працівників.

ВИСНОВКИ

В результаті проведення досліджень з розробки методики вимірювань параметрів вібрацій з використанням вейвлет-аналізу було встановлено, що істотним недоліком спектрів, отриманих при звичайному перетворенні Фур'є, є їх мала інформативність. Так локальні особливості сигналів, наприклад короткі сплески чи провали, розриви і сходинки і т. д. ведуть до появи в спектрі вищих гармонік з малою амплітудою, розмазаних по всій частотній осі. Визначити по них характер локальних особливостей а тим паче провести їх вимірювання досить важко.

Проблеми спектрального аналізу частково вирішуються переходом до віконного перетворення Фур'є. Природно, що оскільки кожне вікно охоплює невелику ділянку за часом, точність опису локальних змін сигналу може бути підвищена. Часто використовуються вікна Гауса, що забезпечують малі спотворення спектра через граничні явища і зменшують прояв ефекту Гібса. Проте ситуація не так проста. Вона впирається у відомий принцип невизначеності Гейзенберга. Згідно з ним, неможливо отримати одночасно високу частоту та високе часове розрізнення. Вибираючи вікно з малою шириною по часу отримуємо високе часове розрізнення. Взавши вікно з великою шириною в часі отримуємо гарне розрізнення по частоті, але погане в часі. Віконне перетворення оперує з вікнами, які мають однакову ширину, а по тому дане протиріччя для нього не вирішується. Ще один принциповий недолік віконного перетворення Фур'є: у ньому як і раніше використовується єдина базисна функція - синусоїда з усіма її зазначеними раніше недоліками.

Застосування вейвлет-перетворення забезпечує двовимірну розгортку досліджуваного одновимірного сигналу, при цьому частота і координата розглядаються як незалежні змінні. В результаті з'являється можливість аналізувати властивості сигналу одночасно у фізичному (час, координата) і в частотному просторах.

З метою підвищення достовірності та точності амплітуди та частоти вібрацій рами та робочих органів автогрейдера на основі методики вейвлет-аналізу часових рядів був розроблений та апробований алгоритм вейвлет-аналізу вимірювальних

часових вибірок. Даний алгоритм був апробований з використанням студентської (free) версії MathCAD 11. Аналіз отриманих результатів показує, що при наявності відношення сигнал/шум рівним 4 запропонований алгоритм з вірогідністю $P = 0,9$ дозволяє виявити сигнали вібрації.

Таким чином, в результаті проведених досліджень мета роботи досягнута, а завдання на дипломну роботу бакалавра виконано у повному обсязі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kyrychenko I. Experimental study of the influence of a combination of operating parameters of a mobile lift on oscillatory processes occurring after locking the working platform / Kyrychenko, O. Reznikov, D. Klets, A. Kholodov // Heavy machinery HM 2021: Proceedings of X International Conference “Heavy Machinery-HM 2021”, Vrnjačka Banja, 23–25 June 2021. Kraljevo: Faculty of mechanical and civil engineering kraljevo university of Kragujevac, 2021. – pp. A1-A12.
2. Kyrychenko I. Research of the influence of the operating Parameters of a mobile lift on the oscillatory processes occurring during the work operation / I. Kyrychenko, O. Reznikov, D. Klets, A. Kholodov, P. Yehorov, O. Olieinikova // Fluid Power, Maribor: – P. 169-178. doi:10.18690/978-961-286-513-9 pp. 169-178.
3. Kyrychenko I.G., Reznikov O.O., Rosenfeld M.V., Momotov A.V., Shalamov M.A., Kokhan I.R. – A method for determining the stability of mobile sub-containers with working platforms in transpo -oral position /Lifting and transport technology, 2021, No. 2(66)/ – P. 20-29
4. Study of the coefficient of increase in the area of the support surface after deployment of the mobile lift / I. G. Kyrychenko, O. O. Reznikov, Yu. V. Ru-kavishnikov, A. O. Knyshenko // Visn. Khnadu: coll. of science pr. - 2021. - Issue 95. - pp. 26-31.
5. R. Coifman. Wavelets and Their Applications [Текст] / (Ed/ R. Coifman) (Boston: Jones and Barlett Publ., 1992).
6. Wavelets Analysis and Applications [Текст] / (Vol. 1: An Introdution to Wavelets Vol. 2: Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications).
7. Койфман. Wavelets and their applications[Текст] / Ed. R. Coifman/ Boston: Jones and Barlett Publ.
8. Кодекс законів про працю України від 10.12.1971 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kodeksy.com.ua/kodeks_zakoniv_pro_pratsyu_ukraini.htm.
9. ДСТУ ISO 9241-3:2001, ДСТУ ISO 9241-2:2004, ДСТУ ISO 9241-5:2004, ДСТУ ISO 9241-6:2004, ДСТУ ISO 9241-7:2004, ДСТУ ISO 9241-9:2004(2006) Ергономічні 18.12.2002 вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: https://dut.edu.ua/ua/news-1-827-7678-suchasni-ergonomichni-vimogi-do-organizacii-robochih-misc-obladnanih-ekrannimi-pristroyami_kafedra-bezpeki-zhittediyalnosti-ta-fizichnogo-vihovannya.

10. ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=48146.

11. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885.

12. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65419.

13. НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_napb_a_01_001-2014_01_ru.php

14. НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_40_1-1_32-01_03_ua.php.

ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Факультет механічний

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ
бакалавра

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ЧАС-ЧАСТОТНОГО АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ РАМИ АВТОГРЕЙДЕРА

Завідувач кафедри, канд. техн. наук, доцент



О. І. Богатов

Нормоконтролер, канд. техн. наук



М. В. Москаленко

Консультант, канд. техн. наук, доцент



О. В. Крайнюк

Керівник, канд. техн. наук, доцент



О. І. Богатов

Студент гр. ММ-36т1-20



В. П. Кравченко

МЕТА, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єкт дослідження – процес визначення вібрації рами автогрейдера ДЗк250В в різних динамічних режимах роботи.

Мета роботи – розроблення методики час-частотного аналізу вібрацій рами автогрейдера.

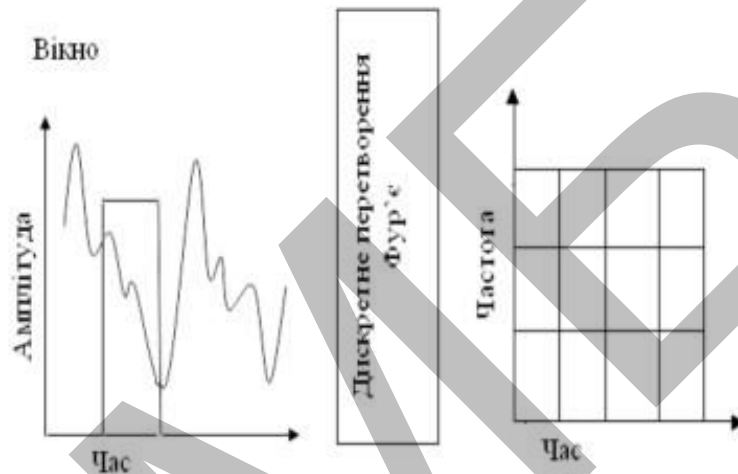
Методи дослідження – системного аналізу, математичного моделювання, теорії ймовірності і випадкових процесів, математичної статистики і теорії похибок вимірювань.

Предмет дослідження — вібрації рами автогрейдера ДЗк250В в різних динамічних режимах роботи.

В бакалаврській роботі розроблена час-частотного аналізу вібрацій рами автогрейдера в різних динамічних режимах його роботи.

ВІКОННЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

методика віконного перетворення
Фур'є



принцип невизначеності
Гейзенберга

Неможливо отримати одночасно високу частоту та високе часове розрізнення. Вибираючи вікно з малою шириною по часу отримуємо високе часове розрізнення. Взяти вікно з великою шириною в часі отримуємо гарне розрізнення по частоті, але погане в часі.

Віконне перетворення оперує з вікнами, які мають однакову ширину, а по тому дане протиріччя для нього не вирішується. Ще один принциповий недолік віконного перетворення Фур'є: у ньому як і раніше використовується єдина базисна функція - синусоїда з усіма її зазначеними раніше недоліками.

ВІКОННЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

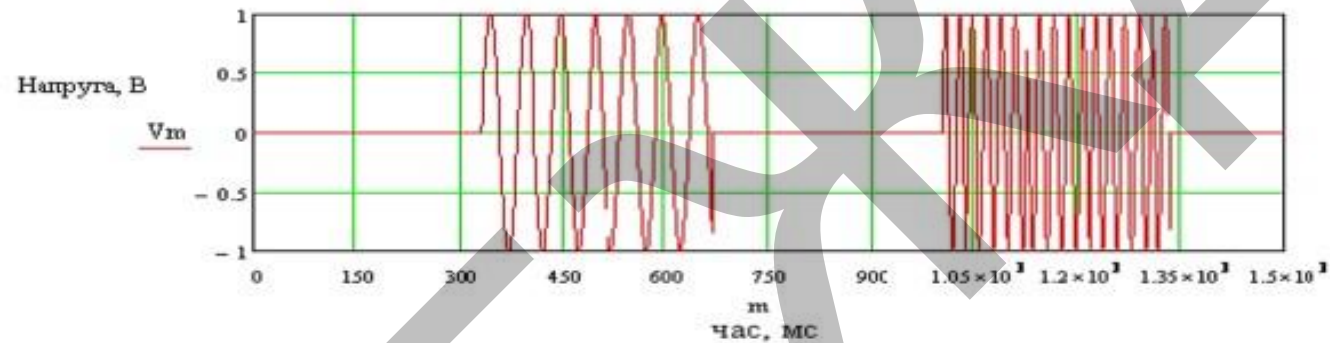


Рисунок 1 - Сигнали імпульсних вібрацій

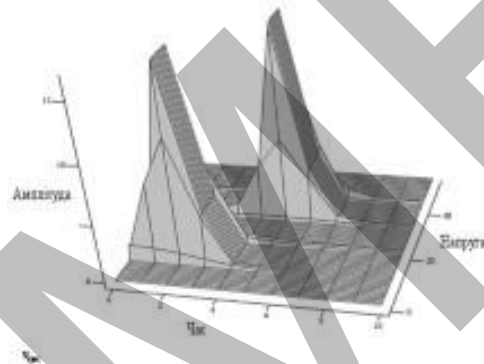


Рисунок 2 - Віконне перетворення Фур'є (розмір вікна – 100 відліків)

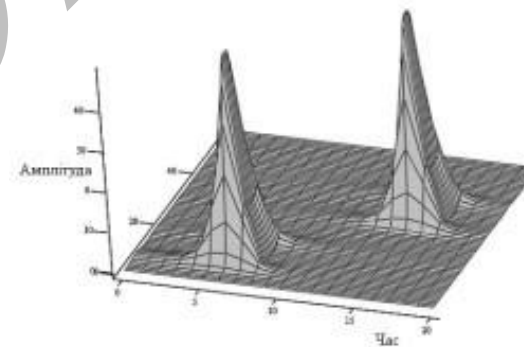


Рисунок 3 - Віконне перетворення Фур'є (розмір вікна – 300 відліків)

ВІКОННЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є СИГНАЛУ З ШУМОМ

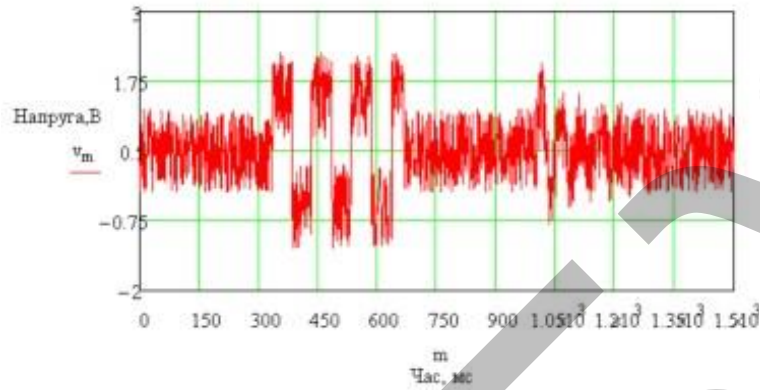


Рисунок 4 - Сигнал з шумом

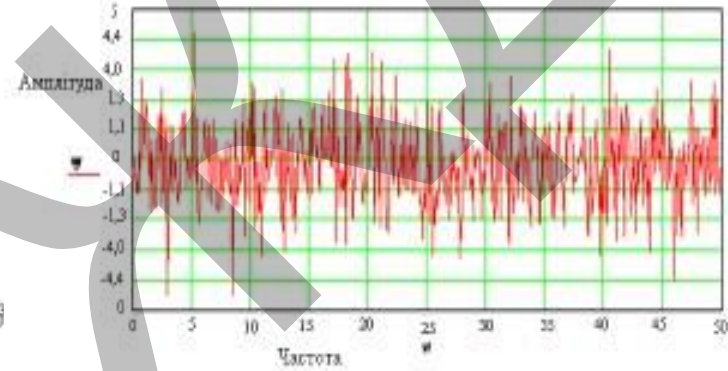


Рисунок 5 - Сигнал вібрацій різними частотами

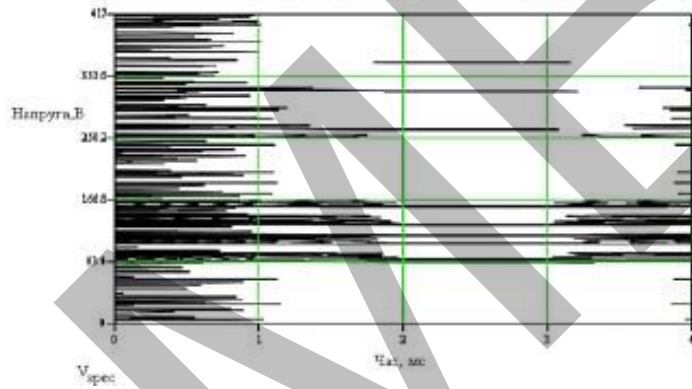


Рисунок 6 - Віконне перетворення Фур'є сигналу з шумом (розмір вікна – 5 відліків)

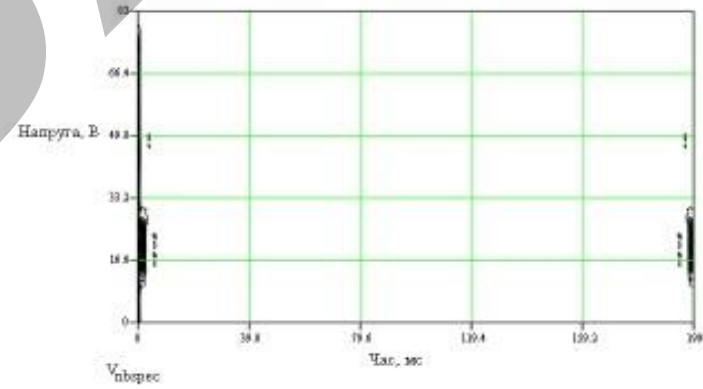


Рисунок 7 - перетворення Фур'є сигналу з шумом (розмір вікна – 5 відліків)

ВЕЙВЛЕТ СИНТЕЗ СИГНАЛУ

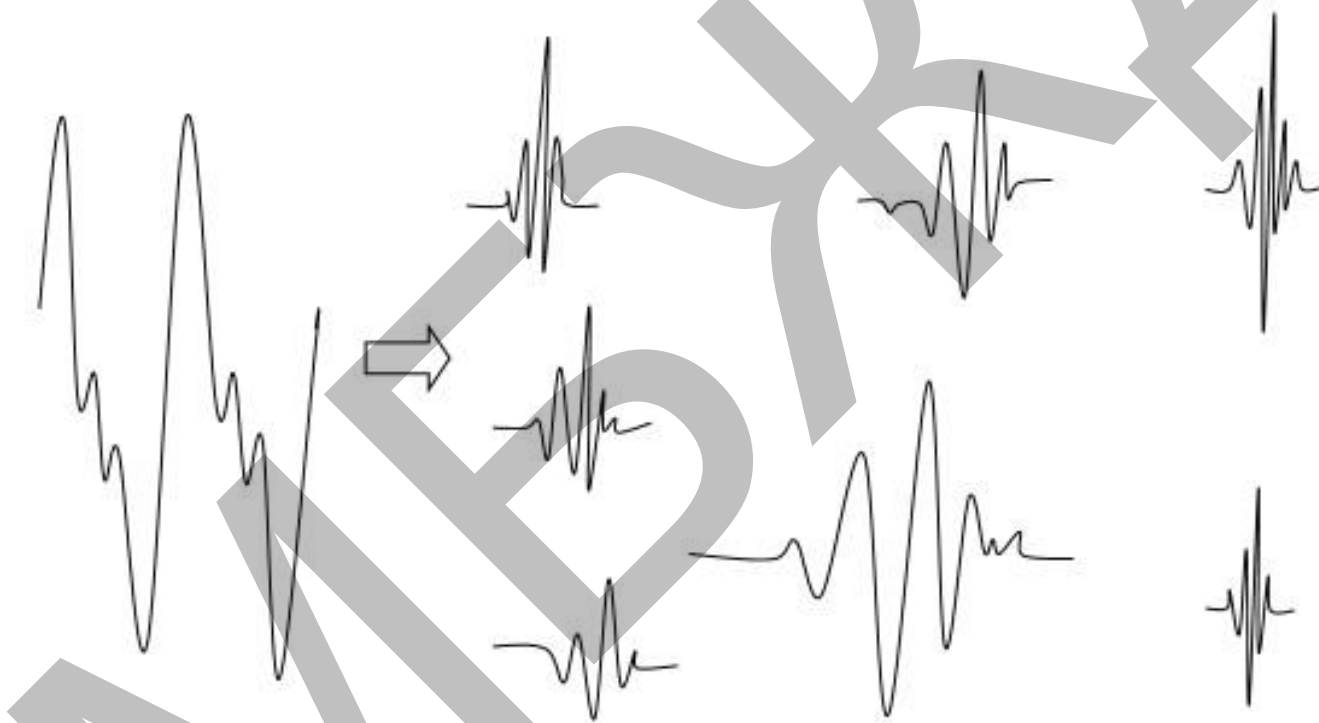
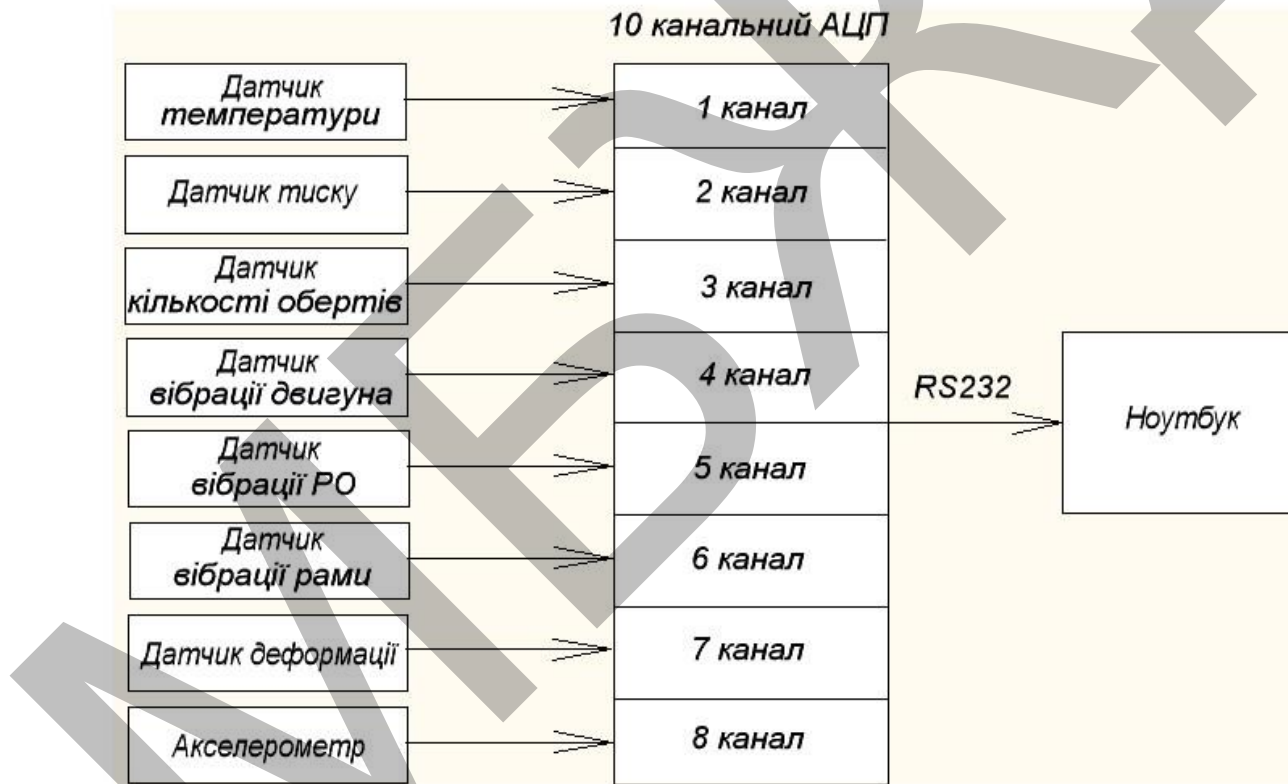


Рисунок 8 - Ілюстрація до вейвлет синтезу сигналу

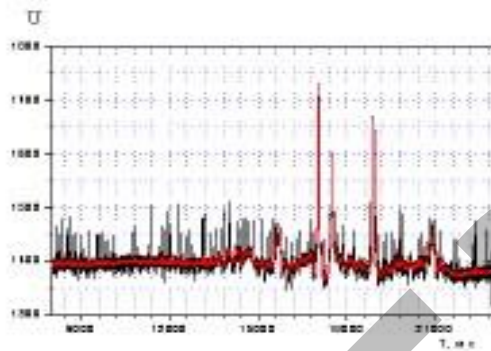
Автогрейдер ДЗк - 250В



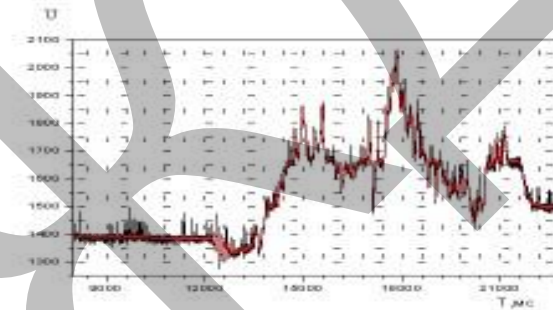
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА



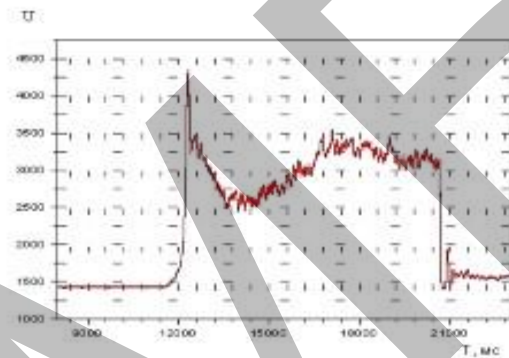
ВІБРАЦІЇ РАМИ АВТОГРЕЙДЕРА



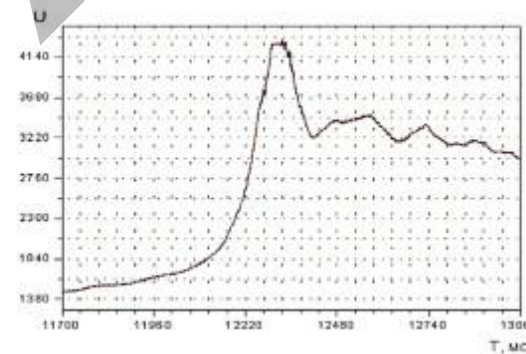
Вібрації рами в слабо навантаженому режимі



Вібрації рами в середньо навантаженому режимі
(сухий ґрунт)



Вібрації рами в сильно навантаженому режимі
(великий масив глини із щебенем)



Вібрації рами в сильно навантаженому режимі
(під навантаження)

ВІКОННЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

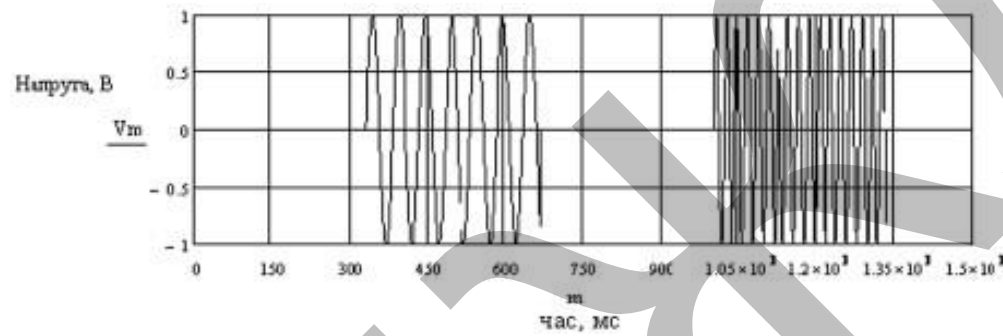


Рисунок 9 – Сигнали імпульсних вібрацій

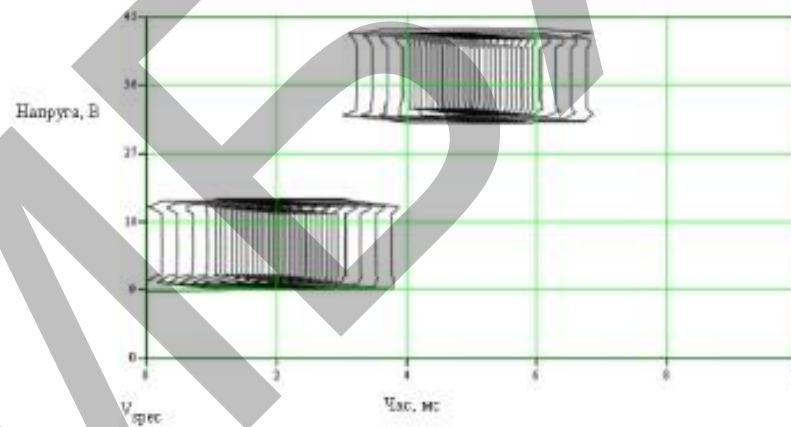


Рисунок 10 – Віконне перетворення Фур'є (розмір вікна 100 відліків)

ВІКОННЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

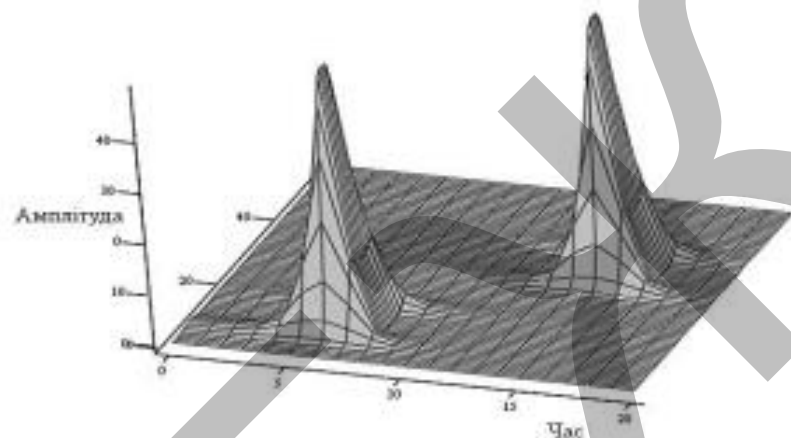


Рисунок 11 – Віконне перетворення Фур'є у просторі (розмір вікна – 300 відліків)

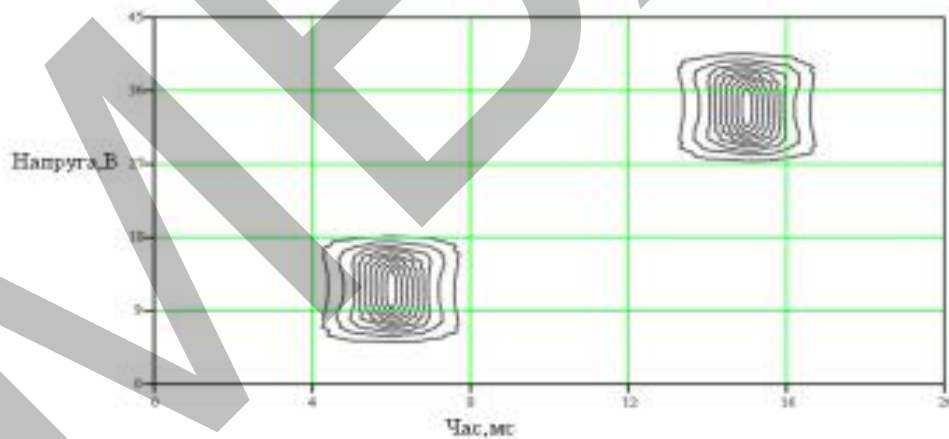


Рисунок 12 – Віконне перетворення Фур'є (розмір вікна – 300 відліків)

ВІКОННЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

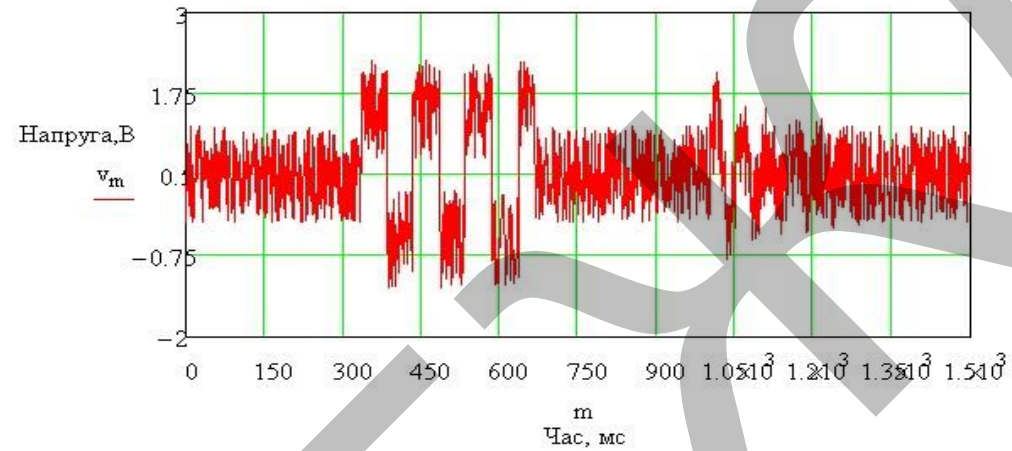


Рисунок 13 – Вимірний сигнал вібрацій

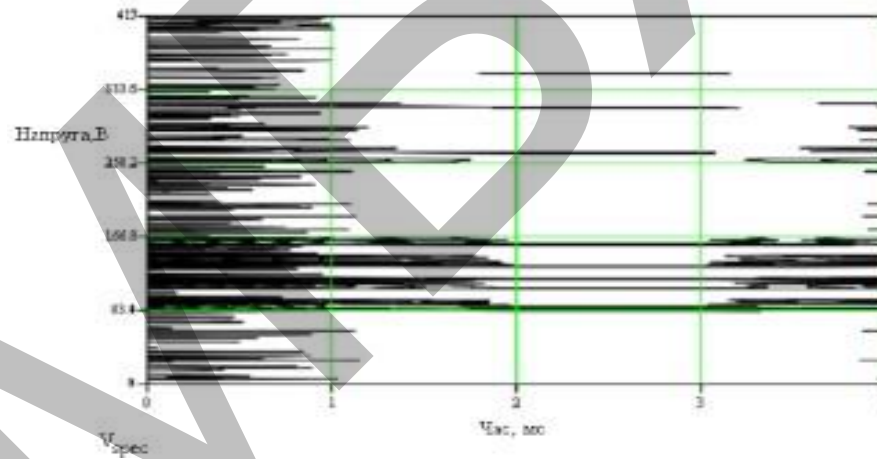


Рисунок 14 - Віконне перетворення Фур'є шумного сигналу

ЧАС-ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

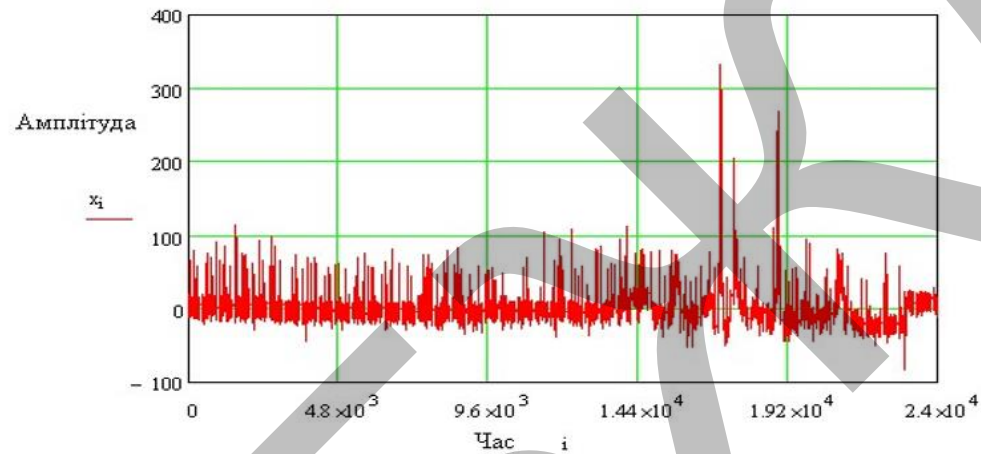


Рисунок 15 – Часовий ряд вібрації

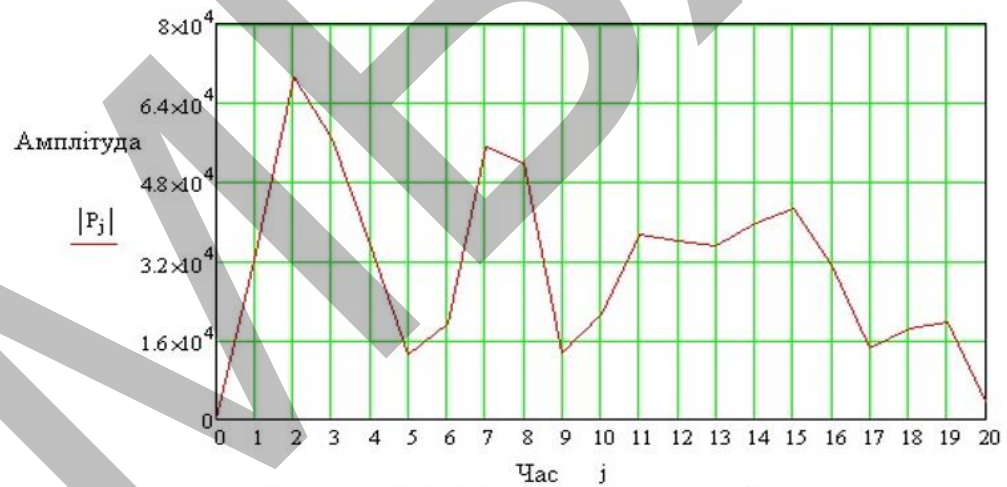


Рисунок 16 – Періодограма виміряного ряду

ЧАС-ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

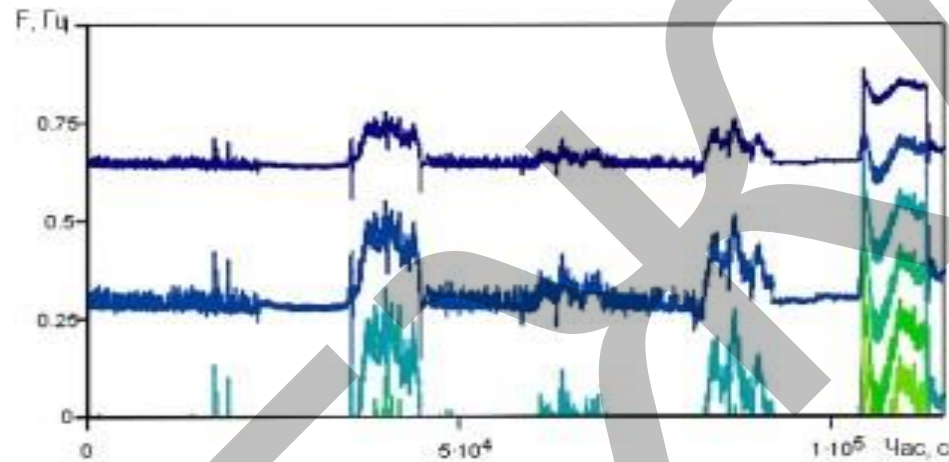


Рисунок 17 – Скалограма часового ряду вібрації

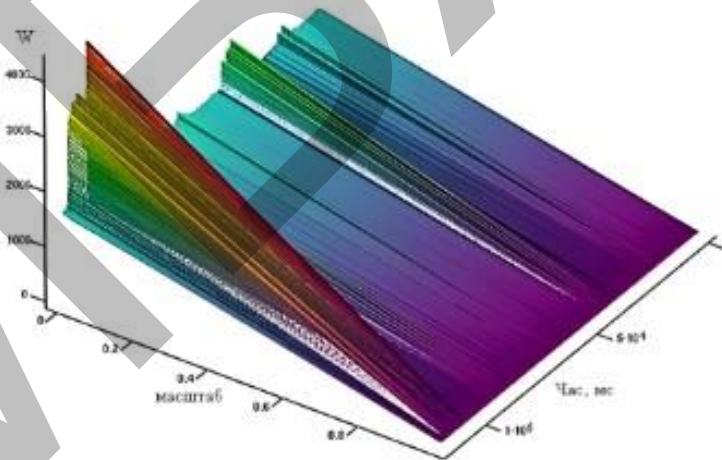


Рисунок 18 -3D зображення скалограми сигналу вібрації

ЧАС-ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

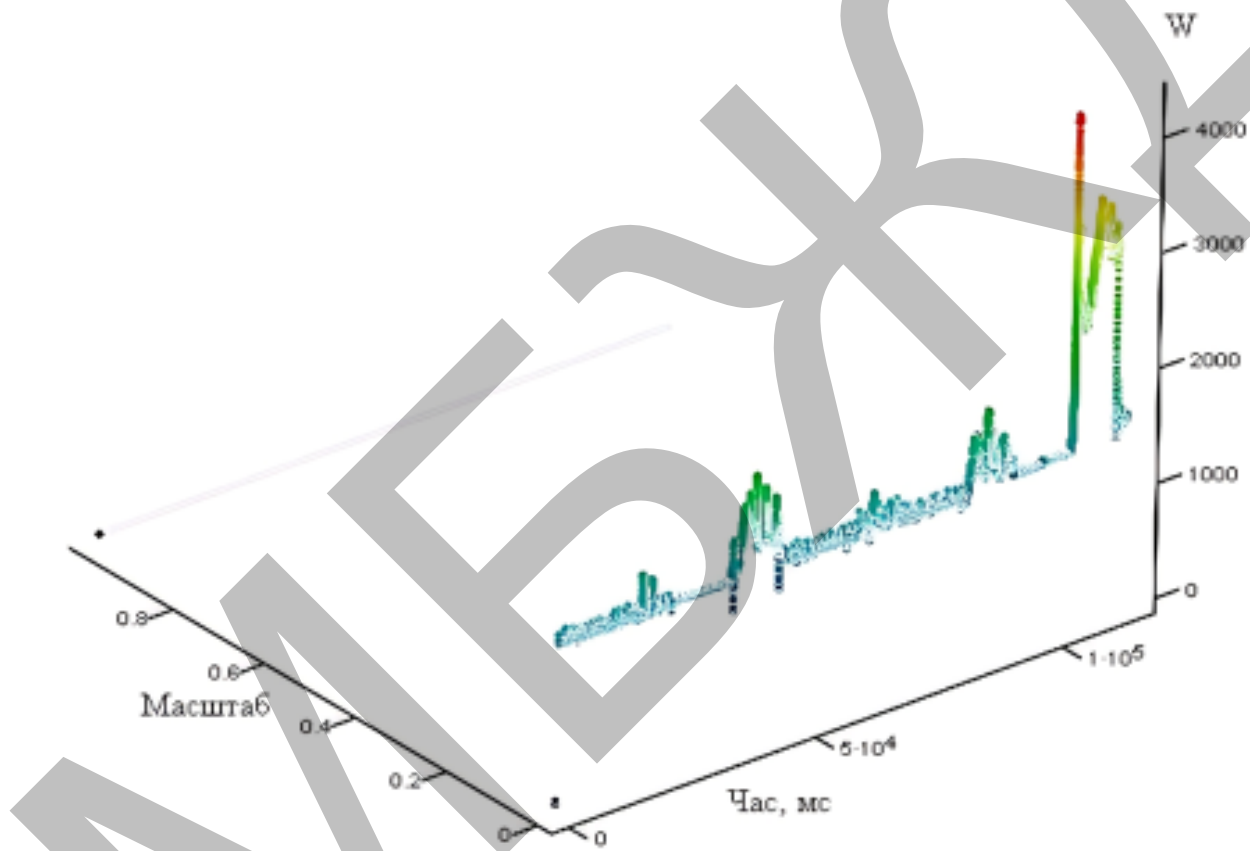


Рисунок 18 - Результат виділення сигналу скалограми із шуму за результатами порогової обробки

ВИСНОВКИ

В результаті проведення досліджень з розробки методики вимірювань параметрів вібрацій з використанням вейвлет-аналізу було встановлено, що істотним недоліком спектрів, отриманих при звичайному перетворенні Фур'є, є їх мала інформативність. Так локальні особливості сигналів, наприклад короткі сплески чи провали, розриви і сходинки і т. д. ведуть до появи в спектрі вищих гармонік з малою амплітудою, розмазаних по всій частотній осі. Визначити по них характер локальних особливостей а тим паче провести їх вимірювання досить важко.

Застосування вейвлет-перетворення забезпечує двовимірну розгортку досліджуваного одновимірного сигналу, при цьому частота і координата розглядаються як незалежні змінні. В результаті з'являється можливість аналізувати властивості сигналу одночасно у фізичному (час, координата) і в частотному просторах.

З метою підвищення достовірності та точності амплітуди та частоти вібрацій рами та робочих органів автогрейдера на основі методики вейвлет-аналізу часових рядів був розроблений та апробований алгоритм вейвлет-аналізу вимірювальних часових вибірок. Даний алгоритм був апробований з використанням студентської (free) версії MathCAD 11. Аналіз отриманих результатів показує, що при наявності відношення сигнал/шум рівним 4 запропонований алгоритм з вірогідністю $P=0,9$ дозволяє виявити сигнали вібрації.