

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

на здобуття освітнього ступеня

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ЕТМ-61
спеціальності 141

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Ребрина В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____ Сисак І.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (прізвище та ініціали)
«__» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Ребрини Валерія Васильовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна системи діагностики силових трансформаторів

Керівник роботи Сисак Іван Михайлович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» листопада 2025 року №4/7-966

2. Термін подання студентом завершеної роботи Грудень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Конструктивне виконання сухих магнітопроводів;
характеристика основних параметрів шихтованих магнітопроводів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Презентація

2.

3.

4.

5.

6.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Теслюк В.М., проректор		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		
2	Аналітичний розділ		
3	Розрахунково-дослідницький розділ		
4	Проектно-конструкторський розділ		
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
6	Висновки		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічної частини		

Студент

(підпис)

Ребрина В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сисак І.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ребрина В.В. Комп'ютерна системи діагностики силових трансформаторів. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. ТНТУ імені Івана Пулюя. ФПТ. Кафедра ЕІ, група ЕТм-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2025.

Стор. – 64; рис. – 10; табл. – 1; креслень - ; джерел - 23; додатків - 0.

Проведений аналіз методів перевірки стаціонарності вібраційних сигналів показав, що застосування статистичних критеріїв – F-критерію Фішера та t-критерію Стюдента – дозволяє достовірно оцінити сталість основних статистичних параметрів (математичного сподівання та дисперсії) у часі, що є необхідною умовою для подальшого коректного аналізу та підвищення точності діагностики технічного стану об'єкта. У результаті розгляду методів статистичного спектрального аналізу встановлено, що найбільш ефективним для дослідження вібрацій шихтованого магнітопроводу є підхід на основі періодограм, який дозволяє отримати асимптотично незміщені оцінки спектральної густини та знизити дисперсію шляхом усереднення або розбиття реалізації на відрізки, що забезпечує підвищення точності та зручність реалізації на ЕОМ. Розроблено макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів, який забезпечує збудження, реєстрацію, аналогову та цифрову обробку вібраційних сигналів магнітопроводу при ударному збудженні, а також реалізує алгоритми статистичного спектрального аналізу для визначення технічного стану пресування магнітопроводу. Проведено експериментальні дослідження на макеті магнітопроводу, виготовленого з магнітострикційної сталі, які підтвердили можливість використання ударного методу для діагностики стану пресування. Визначено основні діагностичні ознаки стану пресування магнітопроводу: амплітуди, частоти та кількість максимумів спектрограм у фіксованій смузі частот.

Ключові слова: комп'ютерна система, діагностика, сухий силовий трансформатор.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Аналіз механічних коливань шихтованого магнітопроводу і огляд моделей їх опису.....	8
1.2 Постановка задач.....	21
2. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	22
2.1 Методи перевірки досліджуваних вібрацій на стаціонарність.....	22
2.2 Методи статистичного спектрального аналізу.....	26
2.3 Висновки до розділу.....	30
3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	31
3.1 Макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів.....	31
3.2 Експериментальна перевірка степені пресування магнітопроводу....	36
3.3 Побудова методики по діагностиці ступеня пресування магнітопроводу.....	42
3.3.1 Формування методичних сукупностей.....	43
3.3.2 Вибір статистичних критеріїв.....	47
3.4 Висновки до розділу.....	50
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ....	52
4.1 Вплив вібрації на організм людини і розроблення заходів щодо зниження його рівня.....	52
4.2 Вплив електромагнітного поля на організм людини.....	53
4.3 Перша допомога людині при ураженні електричним струмом.....	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	61

ВСТУП

Актуальність теми. Силові трансформатори є ключовими елементами енергетичної інфраструктури, від надійності та безперервної роботи яких залежить стабільність електропостачання споживачів [1, 2]. З огляду на зростання навантажень в електричних мережах, старіння основного обладнання та підвищення вимоги до енергоефективності, питання своєчасного контролю технічного стану трансформаторів набуває особливої важливості [3, 4].

Традиційні методи діагностики, які базуються на періодичних вимірюваннях та візуальних оглядах, не завжди дозволяють виявляти дефекти, які розвиваються, або передбачити аварійні ситуації. У цьому контексті впровадження комп'ютерних систем діагностики забезпечує можливість безперервного моніторингу, автоматизованого аналізу параметрів, виявлення аномалій в реальному часі і прогнозування ресурсу роботи обладнання.

Такі системи дають можливість:

- Своєчасно виявляти початкові ознаки несправностей (перегрів, деградація ізоляції тощо);
- Зменшити ризик аварійних відключень і втрат електроенергії;
- Підвищити рівень автоматизації управління енергетичними об'єктами.

Отже, актуальність розробки та впровадження комп'ютерних систем діагностики силових трансформаторів полягає у забезпеченні надійності, безпеки та економічності функціонування енергосистем в умовах їх цифрової трансформації та підвищення вимог до енергоефективності [5-8].

Мета і завдання роботи Метою роботи є розробка та дослідження комп'ютерної системи діагностики технічного стану силових трансформаторів, яка забезпечує автоматизований збір, обробку та аналіз експлуатаційних параметрів з метою підвищення надійності, ефективності та безпеки роботи електроенергетичного обладнання.

Завдання:

1. Провести аналіз методів перевірки стаціонарності вібраційних сигналів;
2. Розглянути методи статистичного спектрального аналізу;
3. Розробити макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів;
4. Провести експериментальні дослідження на макеті;
5. Визначити основні діагностичні ознаки стану пресування магнітопроводу;
6. Побудувати методику формування методичних сукупностей у діагностичному просторі за спектральними параметрами;
7. Розробити правило для визначення стану пресування магнітопроводу на основі критеріїв Неймана-Пірсона.

Об'єкт дослідження – силові трансформатори енергетичних підстанцій та процеси зміни їх технічного стану при експлуатації.

Предмет дослідження – технічні параметри та діагностичні показники, за якими оцінюється стан силових трансформаторів у процесі експлуатації.

Наукова новизна отриманих результатів. Полягає у розробленні концепції комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів, яка забезпечує інтегроване використання даних з різних сенсорів та діагностичних методів для підвищення точності оцінки технічного стану обладнання.

Практичне значення отриманих результатів. Можуть бути використані для підвищення надійності та ефективності експлуатації силових трансформаторів за рахунок впровадження сучасних комп'ютерних засобів діагностики.

Апробація результатів. Результати Ребрини Валерія Васильовича за темою кваліфікаційної роботи «Комп'ютерна системи діагностики силових трансформаторів» були представлені на Міжнародній науково-технічній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ присвяченій 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня

заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (28-29 травня 2025 року), м. Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

Структура роботи. Робота складається з вступу, 4 розділів, загальних висновків, переліку посилань (23 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини - 64 сторінок, 1 таблиць, 10 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Відомо, що застосування сучасних методів, засобів контролю і діагностики дозволяє значно підвищити надійність технічних систем [16-18]. Особливо це важливо для електроенергетики, де вихід з ладу будь-якого об'єкту, наприклад, трансформатора, веде до величезних економічних втрат [19, 20].

Значна кількість літературних джерел з цих питань, опублікованих останнім часом, присвячена теоретичним питанням різних методів діагностики або ж опису технічних засобів діагностування різних об'єктів. Разом з тим питанням обґрунтування і побудови математичних моделей об'єктів, що діагностуються, питанням побудови вирішальних правил по класифікації конкретних видів дефектів приділяється недостатньо уваги. Відомо дуже мало робіт, в яких завдання діагностики розв'язувалося б повністю — від побудови математичних моделей об'єктів до проведення експериментів по діагностиці і класифікації конкретних дефектів в цих об'єктах.

Розробляючи комп'ютерну систему діагностики силових трансформаторів, розглядалися в комплексі питання побудови математичних моделей вібрацій шихтованого магнітопроводу, теоретичного обґрунтування діагностичних ознак стану його пресування і розробки статистичних методів аналізу ударної хвилі, яка поширюється в тілі магнітопроводу з метою ухвалення діагностичного рішення і, нарешті, технічної реалізації запропонованих методів.

1.1 Аналіз механічних коливань шихтованого магнітопроводу і огляд моделей їх опису

При побудові такої моделі вібрації шихтованого магнітопроводу зробимо деякі припущення, зв'язані з тим, що дослідження коливань суцільних пружних систем (до яких відноситься і шихтований магнітопровід) як систем з

безмежним числом ступенів свободи нашоюхується на великі складності принципового характеру.

Для визначення параметрів механічної системи, які є на частотних характеристиках шихтованого магнітопроводу, розглянемо процес виникнення коливань в крайньому пакеті магнітопроводу.

Крайній пакет магнітопроводу спрощено можна представити в вигляді однорідного стержня. Як відомо із теорії коливань, вільні повздовжні коливання однорідного стержня описуються лінійним диференціальним рівнянням другого порядку з частинними похідними:

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

де E - модуль пружності;

ρ - густина матеріалу стержня;

u - повздовжнє зміщення рівноважної точки січення стержня.

Рішення лінійного диференціального рівняння (1.1) при нульових граничних і початкових умовах дає відношення для визначення власних частот коливання стержня:

$$f_n = \frac{n}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.2)$$

де l - довжина стержня.

Вираз (1.2) справедливий для випадку такого стержня, тобто коли поперечний розмір стержня буде невеликим по відношенню до його довжиною. В випадку невиконання цієї умови в рівнянні (1.1) повинен бути введений коефіцієнт корекції. З врахуванням даного коефіцієнту замість виразу (1.2) для круглого стержня потрібно користуватися відношенням:

$$f_n = \frac{n}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \left[1 - \left(\frac{n \cdot v \cdot \pi \cdot r}{2 \cdot l} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

де v - коефіцієнт Пуассона;

r - радіус стержня.

В виразі (1.3) $(\pi \cdot r)^2$ можна представити як $S \cdot \pi$, де S - площа поперечного січення стержня. Вираз (1.3) можна застосовувати і для стержня іншої форми, яка відрізняється від циліндричної, якщо січення стержня має незначне відхилення від окружності.

Розповсюдження вільних повздовжніх коливань, описаних рівнянням (1.1), в однорідному стержні показано на рис. 1.1:

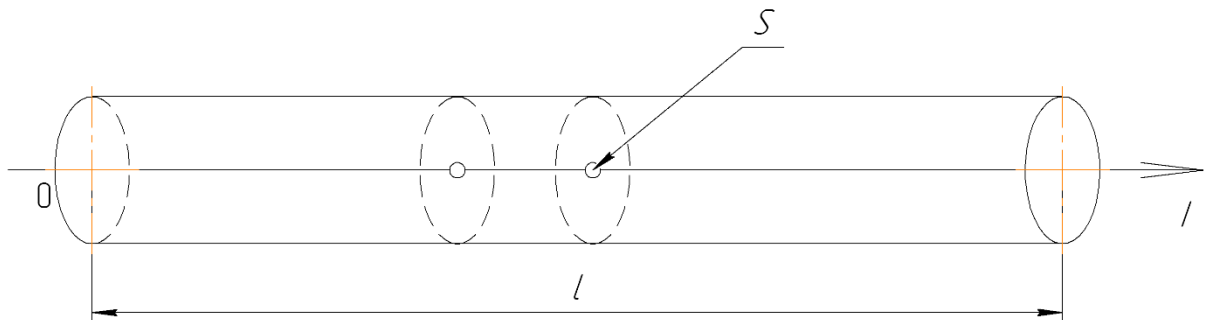


Рис. 1.1 Розповсюдження вільних повздовжніх коливань в однорідному стержні

Крайній пакет сердечника магнітопроводу можна вважати лінійною механічною системою, якщо допустити, що густина матеріалу однакова по всьому об'єму, і тоді його коливання будуть описуватися лінійним рівнянням вигляду (1.1).

Як уже згадувалося, в процесі роботи трансформатора проходить поступове ослаблення пресування активної сталі і в результаті цього відслоєння пластин зубців від шихтованого масиву сердечника. При цьому власна частота коливань пластини зубця визначається довжиною, яка повністю загубила контакт з шихтованим масивом, і граничними умовами, які залежать від характеру закріплення пластини зубця, тобто можливістю переміщення тої частини пластини зубця, де збереглися параметри пресування за стисненням і

ще не створився фіксований проміжок між пластинами і масивом магнітопроводу.

Найбільш розповсюдженою є механічна модель пластини зубця як консольно закріпленого стержня. Розглядається схематична картина магнітного поля окремої пластини в зубцевій зоні крайнього пакету. Там же отримані аналогічні вирази для сил, коли індукція в сердечнику змінюється за гармонічним законом.

Проте, як показує практика, коливання пластин під дією сили, яка виникає внаслідок цієї індукції, не можна вважати строго детермінованими. Тому проведемо обґрунтування випадку, коли в коливаннях крайньої пластини крім детермінованої складової присутня і випадкова.

Розглядається плоска схематична картина магнітного поля окремої пластини в зубцевій зоні, а також спрощення схеми проникнення аксіального потоку в торцеву зону сердечника для двох станів крайнього пакету: для спресованого та розпушеного пакетів, тобто для станів, коли між крайньою і іншими пластинами утворюється зазор. Для більш наглядного представлення розповсюдження сил, діючих на окрему пластину в торцевій зоні при появленні розтушовки, в даній роботі проводяться об'ємні схеми картини магнітного поля в зубцевій зоні. На рис. 1.2 показана об'ємна схематична картина магнітного поля окремої пластини в зубцевій зоні крайнього пакету, а на рис. 1.3 і 1.4 – спрощені об'ємні схеми проникнення аксіального потоку в торцеву зону сердечника для двох станів крайнього пакету – щільно спресованого (рис. 1.3) і розпушеного (рис. 1.4).

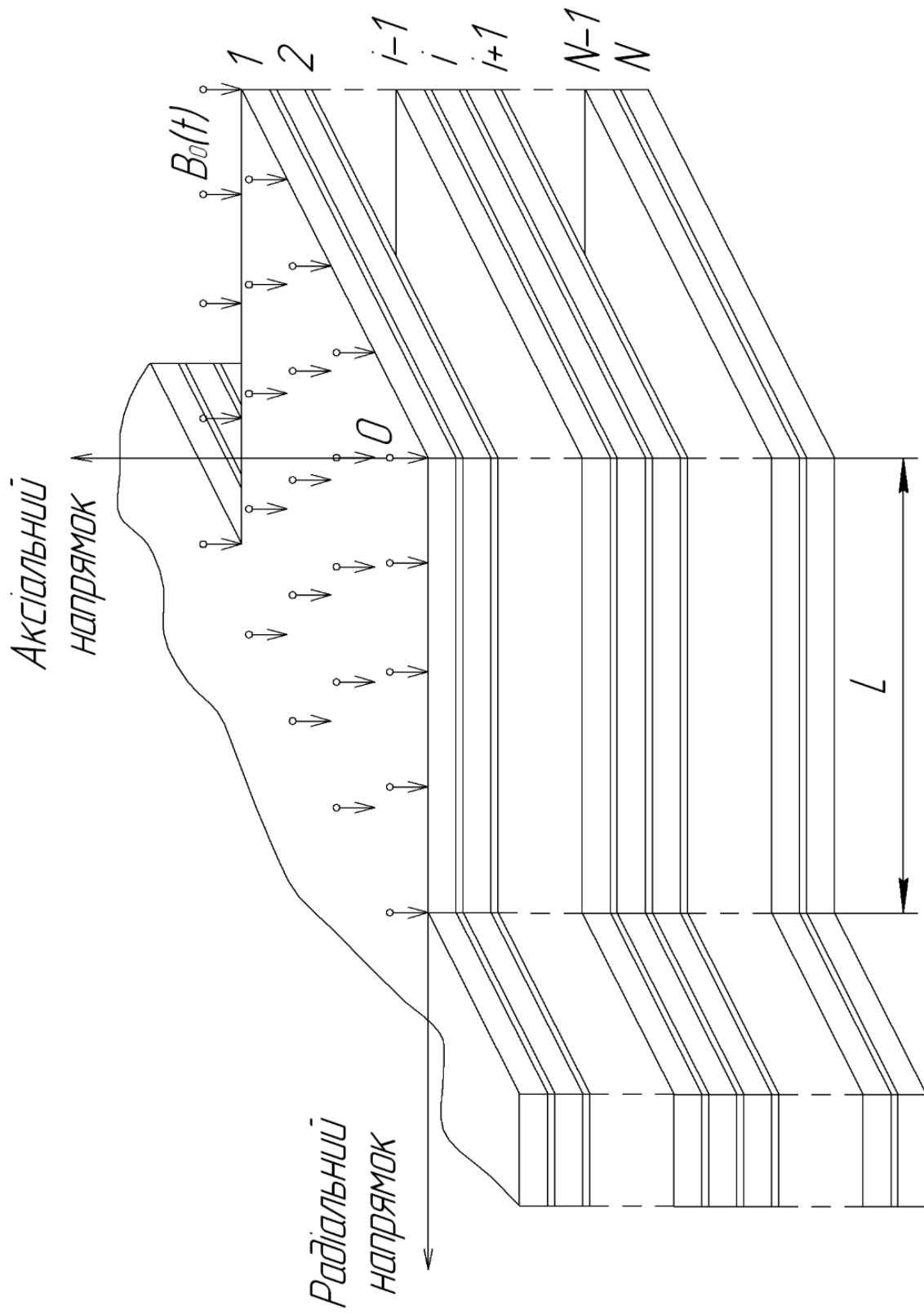


Рис. 1.2 Об'ємна схематична картина магнітного поля окремої пластини в зубцевій зоні крайнього пакету

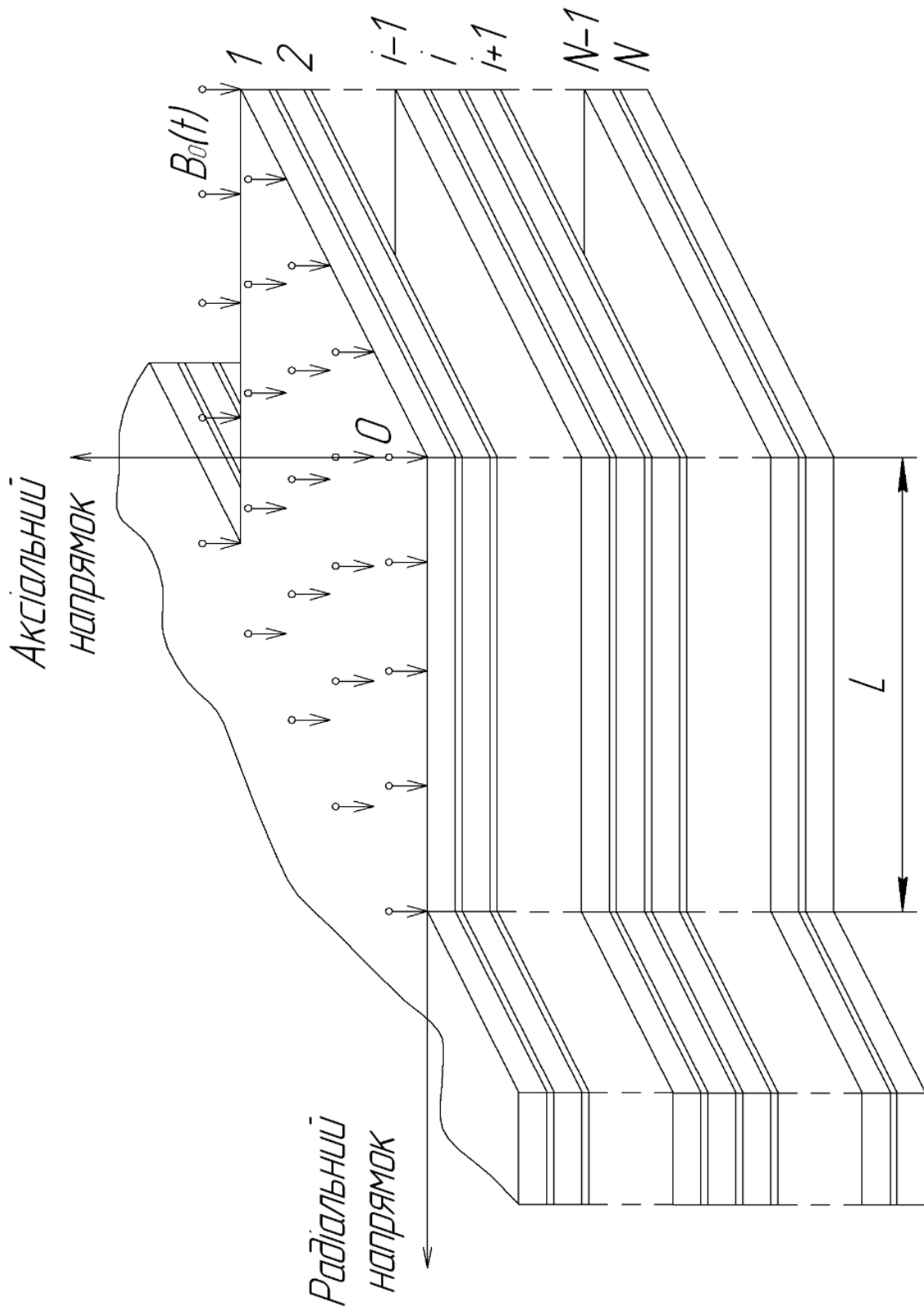


Рис. 1.3 Спрощена об'ємна схема проникнення аксіального потоку в торцеву зону сердечника для двох станів крайнього пакету щільно спресованого

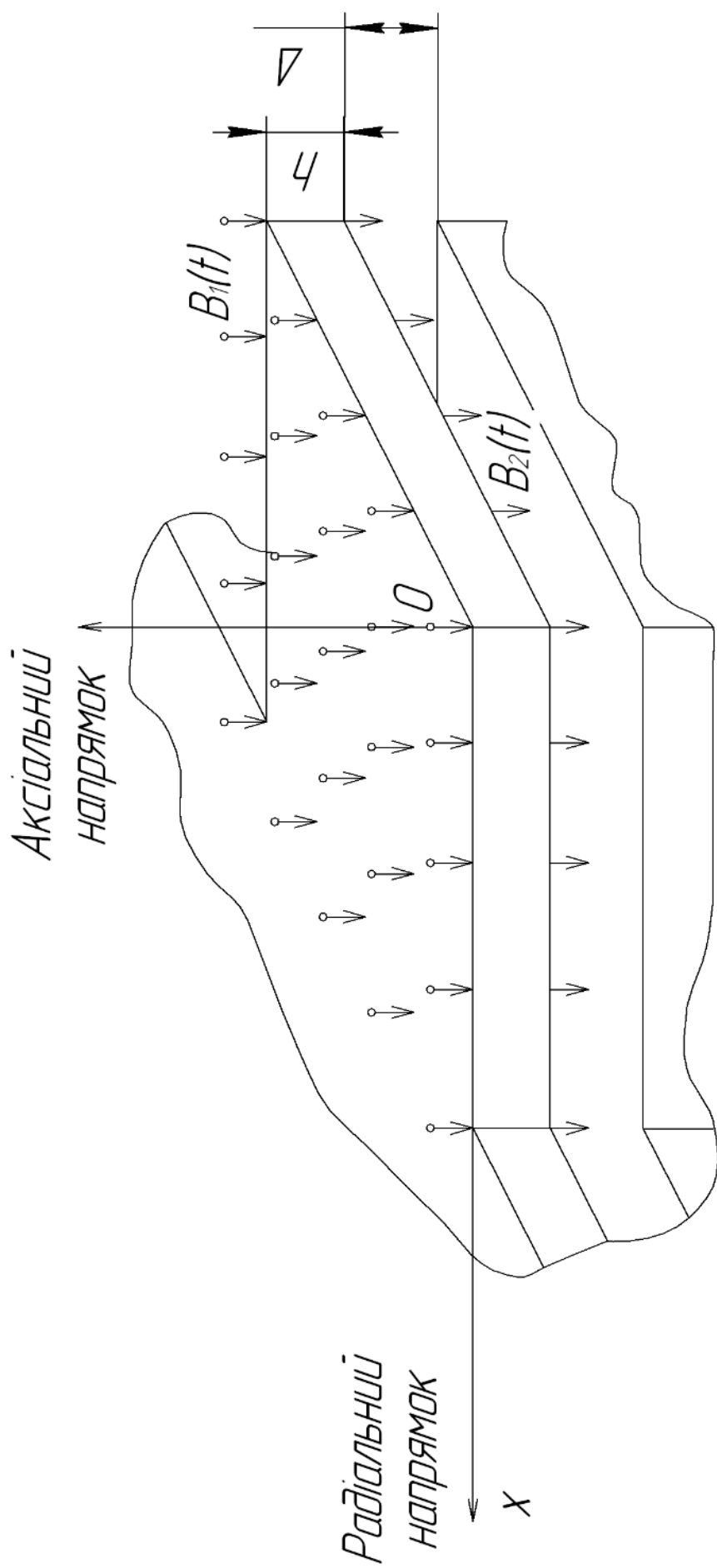


Рис. 1.4 Спрощена об'ємна схема проникнення аксіального потоку в торцеву зону сердечника для двох станів крайнього пакету розпущеного

На приведених рисунках:

h - товщина пластини;

Δ - величина зазору, який утворюється між крайньою пластиною і рештою пакету заліза в результаті розтушовки;

x - радіальна координата пластини, для якої втрачений тісний контакт з рештою пакету шихтованого магнітопроводу;

$f_1(t)$ - сила, яка виникає за рахунок індукції $B_1(t)$, яка входить в окрему пластину зубця;

$f_2(t)$ - сила, яка виникає за рахунок індукції $B_2(t)$, яка виходить із пластин;

$B_0(t)$ - аксіальна індукція в торцевій площині для спресованого пакету.

Сила $f(t)$ - визначається з відношення:

$$f(t) = f_1(t) - f_2(t) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} [B_1^2(t) - B_2^2(t)], \quad (1.4)$$

де $\mu_0 = 1,27 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна проникність повітря, тобто прошарок, який розділяє простір між пластинами.

Вище було відмічено, що на детерміновану складову $f(t)$, яка визначається згідно (1.4), виконує вплив і випадкова складова. Остання виникає в результаті взаємного удару розпушеної крайньої пластини (чи пластин) з спресованою масою сердечника магнітопроводу, що залишилася. В свою чергу ці взаємні удари розпушених пластин викликаються в основному вібраційними хвилями, які виникають в робочому трансформаторі за рахунок аеродинамічного шуму. Таким чином, результуючу силу, яка діє на крайню пластину в розпушеному пакеті, можна описати наступним чином:

$$F(t) = f(t) + \eta'(t) \quad (1.5)$$

де $f(t)$ - сила, яка діє на крайню пластину в результаті гармонічної зміни індукції i , яка визначається згідно (1.4);

$\eta'(t)$ - дія, яка викликає випадкові коливання крайніх пластин сердечника магнітопроводу.

Схематично гармонічна складова і адитивно накладені на неї випадкові імпульси показано на рис. 1.5:

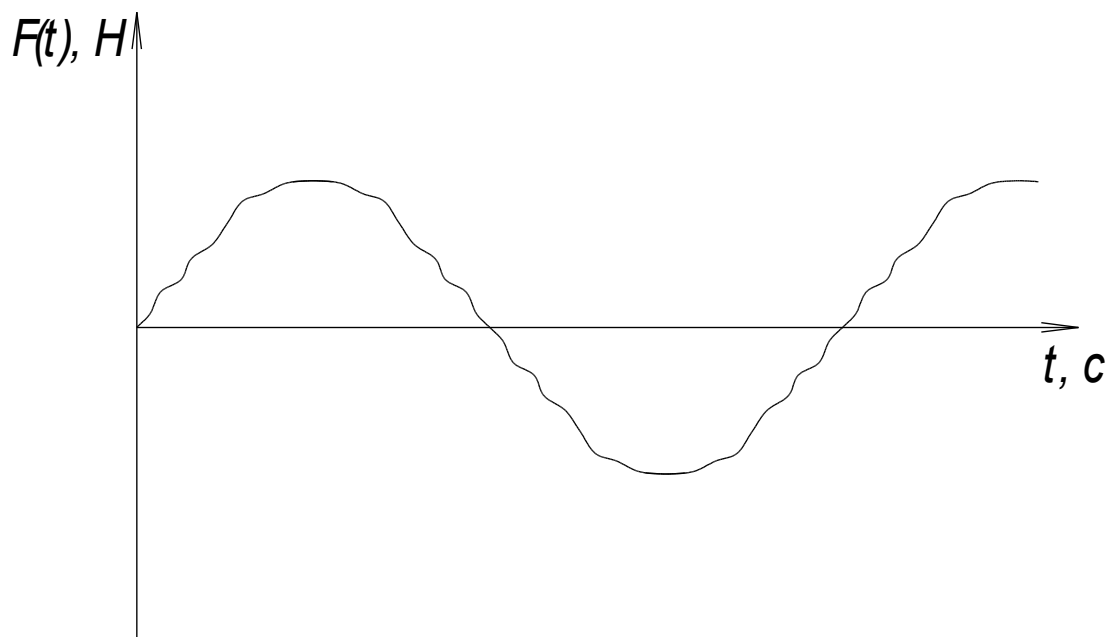


Рис. 1.5 Гармонічна складова і адитивно накладені на неї випадкові імпульси

Дальше розглянемо саме складову $\eta'(t)$, яка входить в відношення (1.5), оскільки вимірюючи випадковий процес, який породжується цією складовою, можна проводити діагностику дефекту типу розтушовки в шихтованому магнітопроводі.

Отже, складова $\eta'(t)$ являє собою потік випадкових за часом і за величиною імпульсів, які назвемо породжуючим процесом $\eta'(t)$. Будемо також вважати, що вказані випадкові імпульси незалежні та задовольняють умові рівномірної випадкової меншості [9]. Як відомо, такий фізичний процес

найбільш адекватно описується математичною моделлю, заснованою на теорії випадкових процесів із незалежними значеннями, розподіл яких підлягає безмежному поділу [10].

Зробимо попередні висновки відносно представлення магнітопроводу як механічної системи, на яку діє розглядуваний процес породження. Шихтований магнітопровід трансформатора являється механічною коливною системою, яка здатна до резонансу на певних частотах. Останнє обумовлене конструктивним виконанням магнітопроводу.

Зробивши попередні пропозиції відносно створення вібрацій магнітопроводу, перейдемо безпосередньо до вибору математичного апарату для описання процесів, що розглядалися вище.

Використавши фізичні передумови побудуємо математичне представлення процесу $\eta'(t)$. Розглянемо також представлення вібрацій електромагнітної системи в вигляді випадкового процесу $\xi(t)$ як відклику лінійної системи, в вигляді якої представляється шихтований магнітопровід, на дію процесу $\eta'(t)$. При побудові математичної моделі вібрації магнітопроводу трансформатора будемо вважати, що вібраційний процес $\xi(t)$, який спостерігається в точці розміщення вібродавача, являється результатом дії на магнітопровід великої кількості окремих імпульсів, кожен з яких визначається імовірнісним законом появи в часі, має деяку тривалість і енергію. Величина останньої носить випадковий характер.

Як було відмічено вище, процес $\eta'(t)$ може бути описаний випадковими процесами з незалежними значеннями, розподіл яких підлягає безмежному поділу. У відповідності з результатами, викладеними в [9, 10], відгук $\xi(t)$ лінійної системи в випадку дії на її вхід процесу із незалежними значеннями також описується цим класом процесів. На базі процесів з незалежними значеннями, які володіють законами розподілу, які діляться безмежно, розроблена теорія лінійних випадкових процесів [9, 10]. При побудові математичних моделей вібрацій магнітопроводу зручно користуватися цим

класом процесів, оскільки лінійні моделі досить добре вивчені. Питанням дослідження лінійних систем при дії на них як детермінованих, так і випадкових процесів присвячені роботи [9, 10, 11]. Скористаємося деякими положеннями, викладеними в цих роботах, для побудови математичних моделей процесів $\eta'(t)$ і $\xi(t)$.

Для кожного вузла магнітопроводу характерна своя власна частота вібрації, тому будемо вважати, що досліджуваний сердечник може розглядатися як багаторезонансна багатовходова нелінійна система, яка характеризується в стаціонарному випадку:

$$\varphi_j(\tau) = \frac{\omega_j^2}{\varphi_j} \cdot e^{-\beta_j \tau} \sin(\varphi_j \tau) U(\tau), j = \overline{1, n} \quad (1.6)$$

де $\varphi_j = \sqrt{\omega_j^2 - \beta_j^2}$; $\omega_j > \beta_j$; $\beta_j > 0$ - коефіцієнт згасання;

ω_j - власні частоти.

Вибір імпульсної перехідної функції вигляду (1.6) обумовлений тим, що таку характеристику має найпростіший *RLC*-контур в коливному режимі, а також задовільним співпадінням теоретичних висновків з експериментальними результатами.

Імовірнісний аналіз запропонованої математичної моделі проведений з пропозицією, що на багаторезонансну систему, діє процес, що можна розглядати як адитивне накладання більшого числа незалежних імпульсів, які виникають в випадкові моменти часу. Такий діючий фізичний процес в рамках сформульованих пропозицій з достатнім обґрунтуванням можна описати моделями типу “білий шум” [9, 10].

Вібрації поступають від різних коливних вузлів:

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^n a_j \xi_j(t), t \in (-\infty; +\infty) \quad (1.7)$$

В встановленому режимі в вигляді лінійного процесу:

$$\xi_j(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_j(t-\tau) a\eta_j(\tau), j = \sqrt{1, n} \quad (1.8)$$

де кожна $\varphi_j(\tau)$, $\tau \in (-\infty; +\infty)$ визначається по (1.6) для окремих компонент, $a\eta_j(\tau)$, $j = \sqrt{1, n}$ - вектор породження процесів, похідні компонент вектору діють на входи систем.

Таким чином, розбиття сумарного процесу вібрації на доданки здійснюється у відповідності з резонансними властивостями кожного каналу і коливної системи магнітопроводу в цілому.

Для отримання характеристик процесу (1.7) у встановленому режимі з врахуванням (1.8) скористаємося викладками. Виходячи з цього:

$$R(s) = \sum_{j=1}^n e^{-\beta_j |s|} (A_{jn} \cos \varphi_j s + B_{jn} \sin \varphi_j |s|) \quad (1.9)$$

при всіх $s \in (-\infty; +\infty)$, де

$$A_{jn} = \frac{a_j \omega_j^2}{2\varphi_j} \sum_{k=1}^n \frac{a_k \omega_k^2 a_{kj}}{\varphi_k} \chi_{2kj} \geq 0;$$

$$B_{jn} = \frac{a_j \omega_j^2}{2\varphi_j} \sum_{k=1}^n \frac{a_k \omega_k^2 b_{kj}}{\varphi_k} \chi_{2kj};$$

де

$$a_{kj} = \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \tilde{\varphi}_{kj}^2} - \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \varphi_{kj}^2} \geq 0;$$

$$b_{kj} = \frac{\tilde{\varphi}_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \tilde{\varphi}_{kj}^2} + \frac{\varphi_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \varphi_{kj}^2};$$

$$\beta_{kj} = \beta_k + \beta_j; \varphi_{kj} = \varphi_k + \varphi_j; \tilde{\varphi}_{kj} = \tilde{\varphi}_k - \tilde{\varphi}_j;$$

В (1.9) компоненти вектору φ_j , $\sqrt{1, n}$ будемо називати резонансними частотами, а компоненти вектору β_j , $\sqrt{1, n}$ - коефіцієнтами затухання. Хоча

останній вираз отримано для випадку φ_j , $\sqrt{1, n}$, проте воно залишається справедливим при будь-яких близьких до нуля резонансних частотах і по безперервності може бути розповсюджено і на випадок, коли при деякому j частота $\varphi_j \rightarrow 0$. Цим підтверджується назва процесу (1.7) як багаторезонансної моделі.

Процес (1.7)

$$S(\omega) = 2 \sum_{j=1}^n \frac{A_{jn} \beta_j (\omega_j^2 + \omega^2) + B_{jn} \varphi_j (\omega_j^2 - \omega^2)}{(\omega_j^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \varphi_j^2} \quad (1.10)$$

Таким чином, автокореляційна функція (1.9) і спектральна густина (1.10) процесу (1.7) повністю визначаються параметрами φ_j і $\beta_j, j = \bar{1, n}$. В частковому випадку, можна застосовувати для досліджень, які розглядаються в даній роботі, їх можна застосовувати в якості діагностичних ознак для визначення ступені пресування досліджуваного магнітопроводу.

Для відгуку багаторезонансної системи, яка представляється в вигляді (1.7), отриманий загальний вигляд логарифму характеристичної функції. Використовуючи перетворення Фур'є-Стільтьєса, можна знайти функцію (1.7), тобто отримати повне імовірнісне рішення задачі дослідження вібрацій шихтованого магнітопроводу.

В даній роботі обмежимося тільки характеристиками, розглянутими вище, оскільки для вирішення задачі діагностики ступені пресування шихтованого магнітопроводу досить обмежитися отриманням статистичних спектральних характеристик вібрацій, які збуджуються в досліджуваному магнітопроводі. Виходячи з цього в наступному розділі зупинимося на деяких статистичних методах, які покладені в основу програмного забезпечення.

1.2 Постановка завдань

1. Провести аналіз методів перевірки стаціонарності вібраційних сигналів;
2. Розглянути методи статистичного спектрального аналізу;
3. Розробити макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів;
4. Провести експериментальні дослідження на макеті;
5. Визначити основні діагностичні ознаки стану пресування магнітопроводу;
6. Побудувати методику формування методичних сукупностей у діагностичному просторі за спектральними параметрами;
7. Розробити правило для визначення стану пресування магнітопроводу на основі критеріїв Неймана-Пірсона.

2. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

Результати імовірнісного аналізу лінійної моделі вібрацій шихтованого магнітопроводу і дані практики показують, що дуже ефективними при дослідженні вібрацій шихтованого магнітопроводу виявляються методи статичного спектрального аналізу. Однак застосовувати ці методи можна тільки в випадках, коли досліджувані вібрації являються стаціонарним випадковим процесом. Нижче розглядаються методи перевірки досліджуваних вібрацій на стаціонарність, а також деякі методи статистичного спектрального аналізу, які були покладені в основу пакету прикладних програм, які використовуються в складі пакету комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів.

2.1 Методи перевірки досліджуваних вібрацій на стаціонарність

Розглянемо деякі статистичні критерії перевірки на стаціонарність, покладені в основу відповідного програмного забезпечення.

Стаціонарність вимірюваного процесу по досліджуваних реалізаціях можна перевірити при аналізі поведінки в часі оцінок основних статистичних параметрів (математичне сподівання $M\xi(t)$, дисперсія $D\xi(t)$ і т.д.), отримуваних із відрізків зареєстрованих вібрацій, взятих на послідовностях інтервалів часу, що не пересікаються. Якщо досліджувані сигнали представляють собою реалізації стаціонарного випадкового процесу, то появляється можливість скоротити число експериментальних даних, які враховуються при діагностичному аналізі, без зниження правдивості проведеної діагностики.

Оскільки в пакеті комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів пропонується використовувати цифрові методи обробки сигналів, розглянемо статистичні критерії перевірки стаціонарності для випадкових процесів з дискретним часом, які одержуються з допомогою аналого-цифрового перетворення, тобто для часових рядів вигляду:

$$\{\xi(k\Delta t), k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\} \quad (2.1)$$

де Δt - крок дискретизації. При цьому часовий ряд спостерігається на кінцевих відрізках інтервалу T . В результаті експерименту одержується ряд числових значень x_k , які відповідають $\xi(k\Delta t)$ при $k = \sqrt{1, n}$, процесу (2.1). Ці x_k являють собою реалізацію вибірки об'єму n .

Статистична гіпотеза H_0 про стаціонарності процесу (2.1) проти альтернативної гіпотези H_1 про нестаціонарність перевіряється на основі такої вибірки, що рівносильне повірці вихідного процесу $\xi(t)$, $t \in T$ на стаціонарність на дискретній решітці $t_k = k\Delta t$, $k = \sqrt{1, n}$.

Для перевірки стаціонарності досліджуваного вібраційного сигналу в випадку, якщо густина його розподілу має нормальний закон, можна скористатися методами перевірки статистичних гіпотез з використанням t і F - критерію [12, 13]. Їх використання дозволяє здійснити перевірку досліджуваного процесу за математичним сподіванням і дисперсією, що для нормального закону розподілу еквівалентно повірці на стаціонарність у чіткому змісті.

Гіпотеза про стаціонарність нормального процесу, який представляється двома незалежними відрізками реалізації ($N = 2$) об'єму n_1 і n_2 , по дисперсії перевіряється з використанням F - критерію Фішера. По цьому критерію гіпотеза про рівновагу дисперсій, які оцінюються по двох реалізаціях процесу $\xi(t)$, взятих на інтервалах часу T_1 і T_2 , що не пересікаються, перевіряється за допомогою статистики:

$$W_{n_1-1, n_2-1} = \frac{\tilde{\mu}_2^{(1)}}{\tilde{\mu}_2^{(2)}} = \frac{\frac{n_1}{n_1-1} \mu_2^{(1)}}{\frac{n_2}{n_2-1} \mu_2^{(2)}} \quad (2.2)$$

де $\tilde{\mu}_2^{(1)}, \tilde{\mu}_2^{(2)}$ - незміщені оцінки дисперсії на інтервалах T_1 і T_2 дискретизованих вибірок об'єму n_1 і n_2 , які визначаються по відношенню:

$$\tilde{\mu}_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\xi_j - v_1)^2 \quad (2.3)$$

$\mu_2^{(1)}, \mu_2^{(2)}$ знаходяться з відношення:

$$\mu_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\xi_j - v_1)^k, k = 2, 3, \dots \quad (2.4)$$

при $n = n_1$ і $n = n_2$ відповідно. Статистика W_{n_1-1, n_2-1} при справедливості гіпотези про сталість значення дисперсії в часі має p -розподілення з степенями вільності $n_1 - 1$ і $n_2 - 1$ [12].

Критична область, яка відповідає розглядуваному випадку перевірки гіпотези про стаціонарність по дисперсії, будується наступним чином. По таблиці для F -розподілу, наприклад, в [12], для деякого рівня α знаходимо значення $F_{\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1}$. В [12] ці значення приводяться тільки для $\alpha = 0,02$ при $n_1 - 1$ і $n_2 - 1$ від 1 до 500 з інтерполяцією. Є таблиці F -розподілу для інших значень α .

Якщо при заданому рівні значимості α отримане значення статистики W_{n_1-1, n_2-1} буде менше табличного $F_{\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1}$, то розходження між дисперсіями можна вважати неважливим — незначним. Тоді застосовується гіпотеза про стаціонарність досліджуваного процесу. В іншому випадку, тобто коли W_{n_1-1, n_2-1} більше $F_{\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1}$, гіпотеза про стаціонарність відкидається.

Відмітимо, що в розглянутому випадку перевірки на стаціонарність з допомогою F -критерію за дисперсією немає ніяких припущень відносно математичних сподівань вихідного процесу. Тому необхідно починати з такої перевірки, і тільки, якщо після цього виникає які-небудь сумніви у відношенні

постійності математичних сподівань в часі, то здійснюється ще одна перевірка з використанням t -критерію.

Двохвибірний t -критерій ($N = 2$) використовується при повірці гіпотези про стаціонарність досліджуваних вібрацій при постійній дисперсії. При цьому гіпотеза H_0 про рівність математичних сподівань двох незалежних нормальних випадкових вибірок із генеральної сукупності з нормальною функцією розподілу перевіряється з допомогою t -статистики:

$$t = \frac{v_1^{(1)} - v_2^{(2)}}{\sqrt{n_1 \mu_2^{(1)} + n_2 \mu_2^{(2)}}} \sqrt{\frac{n_1 + n_2 - 2}{n_1 - n_2}} \quad (2.5)$$

$$v_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_j^k, k = 2, 3, \dots$$

кожної реалізації; $\mu_1^{(1)}, \mu_2^{(2)}$ - оцінка дисперсії (14) при $k = 2$ кожної із реалізацій; n_1, n_2 - об'єми вибірок кожної із двох реалізацій. Коли об'єм вибірок однаковий, тобто $n_1 = n_2 = n$, вираз (2.5) перетворюється в вигляд:

$$t = \frac{v_1^{(1)} - v_2^{(2)}}{\sqrt{\frac{\mu_2^{(1)} + \mu_2^{(2)}}{n}}} \quad (2.6)$$

При справедливості гіпотези H_0 , тобто що досліджувані вібрації - стаціонарний процес, яка визначається відповідно з (2.5) чи (2.6) статистика має t -розподіл Стюдента з $m = n_1 + n_2 - 2$ чи $m = 2n - 2$ степенями вільності.

Різниця $v_1^{(1)}, v_2^{(2)}$ рахується важливою [12] при деякому α , якщо $|t| > t_{m, 1-\frac{\alpha}{2}}$.

При цьому гіпотеза H_0 не приймається, тобто вважаємо, що вібрації являються нестаціонарними. Якщо $|t| \leq t_{m, 1-\frac{\alpha}{2}}$, то гіпотеза H_0 приймається.

Описаними F - і t - критеріями можна скористатися для перевірки стаціонарності досліджуваних вібрацій і в випадку, якщо їх розподіл відрізняється від нормального. При цьому вібрації перевіряються на стаціонарність в широкому змісті.

На основі розглянутих виразів розроблена програма досліджуваних вібрацій на стаціонарність. Після проведення такої перевірки відібрані реалізації вібрацій піддавалися з допомогою комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів обробці по програмі статичного спектрального аналізу. Зупинимося на деяких відношеннях, покладених в основу цієї програми.

2.2 Методи статистичного спектрального аналізу

Спектральний аналіз стаціонарних процесів застосовується в різних областях науки і техніки. Серед задач, які вирішуються за допомогою спектрального аналізу, можна назвати:

- знаходження скритих періодичностей;
- побудова моделей і перевірки гіпотез;
- оцінка параметрів моделі;
- проектування фільтрів по методу вікна;
- оцінка частотних характеристик сигналів.

При побудові оцінок спектральної густини можна виділити два підходи. Перший із них, класичний, заснований на статистиках типу періодограм [14]. Другий, моделюючий підхід, заснований на узгодженні виду моделі випадкового процесу з результатами вимірювань. Такий підхід дозволяє підвищити рішачу здатність спектрального аналізу при наявності коротких реалізацій.

Виходячи з багаторезонансної структури вібрацій шихтованого магнітопроводу, а також враховуючи їх випадковий характер, можна запропонувати досить ефективний спосіб для дослідження цих вібрацій – підхід, заснований на статистиках типу періодограм, чи прямий метод оцінки спектральної густини. Розглянемо цей метод.

Виник інтерес до статистик виду:

$$S''(f) = \frac{1}{n} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \xi_n e^{-i2\pi n f} \right|^2, f \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \quad (2.7)$$

отримавши назву періодограм. Тут N - об'єм вибірки, ξ_n - стаціонарний часовий ряд. Перетворивши суму в (2.7), отримаємо вираз:

$$S''(f) = \sum_{m=-N+1}^{N-1} \left(1 - \frac{m}{N}\right) R'(m) e^{-i2\pi m f},$$

де $R'(m)$ - оцінка автокореляційної функції.

Математичне сподівання оцінки (17) рівне

$$M \left\{ S''(f) \right\} = \sum_{m=-N+1}^{N-1} \left(1 - \frac{m}{N}\right) R(m) e^{-i2\pi m f}$$

Таким чином,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} M \left\{ S''(f) \right\} = S(f)$$

і оцінка (2.7) отримується асимптотично незміщеною. Проте її дисперсія при $N \rightarrow \infty$ до нуля не приближається, і оцінка являється неправильною.

Одним із способів побудови правильної оцінки на базі періодограми є усереднення сусідніх значень періодограми. Оцінка будується наступним чином.

Нехай $S(N)$ - ціле число, таке, що $\frac{S(N)}{N}$ близьке до $f, f \neq 0, \pm \frac{1}{2}$. Тоді усереднена

періодограма визначається наступним чином:

$$S(f) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J S''\left(\frac{S(N)+J}{N}\right) \quad (2.8)$$

Математичне сподівання оцінки визначається виразом [15]

$$M\{S(f)\} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J V\left(\frac{S(N)+J}{N} - f'\right) S(f') df'$$

$$\text{де } V(f) = \left(\frac{\sin \frac{Nf}{2}}{\sin \frac{f}{2}} \right)^2 - \text{ядро Фейера.}$$

Можна показати, що дисперсія оцінки (18) приблизно рівна [15], тобто:

$$D\{S(f)\} = \frac{S^2(f)}{f}$$

Збільшуючи J , можна зменшити дисперсію оцінки (2.8). Однак, якщо J велике, а $S(f)$ різко змінюється в інтервалі усереднення, то зміщення оцінки (2.8) може бути великим.

Наступним методом побудови правильної оцінки спектральної густини на базі періодограми являється усереднення періодограм, обрахованих для декількох відрізків реалізації часового ряду, які не пересікаються. Оцінка будується таким чином. Реалізація довжини N розбивається на J відрізків, що не пересікаються. Для кожного відрізка довжини $U = \frac{N}{J}$ обраховується

$$S'''(f, j) = \frac{1}{U} \left| \sum_{u=0}^U \xi(u + jU) e^{-j2\pi u f} \right|^2, j = 0, 1, \dots, J-1$$

Тоді правильна оцінка визначається з відношення:

$$S(f, j) = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} S'''(f, j) \quad (2.9)$$

Оцінка (2.9) має математичне сподівання [15]

$$M\{S(f)\} = \frac{1}{J} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} V(f-f') S(f') df'$$

де $V(f)$ - ядро Фейєра, і дисперсію:

$$D\{S(f)\} = \frac{S^2(f)[1+p(f)]}{N} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} V(f') df',$$

$$p(f) = \begin{cases} 1 & \text{при } f = 0, \frac{1}{2}, \\ 0 & \text{при } f \neq 0, \frac{1}{2}. \end{cases}$$

Оцінка (2.9) добре пристосована для застосування на ЕОМ, оскільки дозволяє знизити вимоги до пам'яті внаслідок розбиття реалізації на відрізки, а також до швидкодії, так як декілька швидких перетворень Фур'є відрізків реалізації виконуються швидше, чим швидке перетворення Фур'є всієї реалізації.

Оцінки (2.8), (2.9) можуть бути модифіковані. Так, оцінка (2.8) може виконуватися при нерівномірному зважуванні, а оцінка (2.9) - для відрізків реалізації, що не перекриваються. В обох оцінках можуть бути також застосовані вікна для попереднього зважування вихідних даних.

Розглянуті вище алгоритми були покладені в основу програмного забезпечення для комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів. Перейдемо безпосередньо до розгляду структурної схеми і опису принципу дії цієї комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів.

2.3 Висновки до розділу

1. Проведений аналіз методів перевірки стаціонарності вібраційних сигналів показав, що застосування статистичних критеріїв – F-критерію Фішера та t-критерію Стьюдента – дозволяє достовірно оцінити сталість основних статистичних параметрів (математичного сподівання та дисперсії) у часі, що є необхідною умовою для подальшого коректного аналізу та підвищення точності діагностики технічного стану об'єкта.
2. У результаті розгляду методів статистичного спектрального аналізу встановлено, що найбільш ефективним для дослідження вібрацій шихтованого магнітопроводу є підхід на основі періодограм, який дозволяє отримати асимптотично незміщені оцінки спектральної густини та знизити дисперсію шляхом усереднення або розбиття реалізації на відрізки, що забезпечує підвищення точності та зручність реалізації на ЕОМ.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів

Вище була обґрунтована стохастична модель вібрацій магнітопроводу трансформатора при ударному збудженні, а також методи статистичного спектрального аналізу виникаючої при цьому вібраційної хвилі.

Особливістю методу ударної діагностики в порівнянні з іншими вібраційними методами являється те, що при ударному збудженні приходится досліджувати відносно короткі по тривалості випадкові вібраційні хвилі. Аналіз таких вібросигналів, визначення їх статистичних параметрів і характеристик, які використовуються в якості діагностичних ознак, а також забезпечення процесів навчання і прийняття рішень ставлять задачу створення спеціальних приборів і систем ударної вібродіагностики, які дозволяли б надійно реєструвати, обробляти і аналізувати вихідний випадковий процес.

Задача діагностики магнітопроводів з допомогою ударного збудження може бути вирішена з допомогою макету комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів, структурна схема якої показана на рис. 3.1

Розроблений макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів забезпечує:

- збудження вібраційних хвиль в досліджуваному магнітопроводі;
- реєстрацію, вимірювання, аналогову фільтрацію і підсилення вібраційного випадкового сигналу;
- перетворення аналогового сигналу в цифровий код і ввід останнього в ЕОМ;
- аналіз випадкового вібраційного процесу та визначення оцінок, що відповідають умовно придатному магнітопроводу і магнітопроводу з ослабленим пресуванням масиву;
- навчання і діагностування стану пресування магнітопроводу.

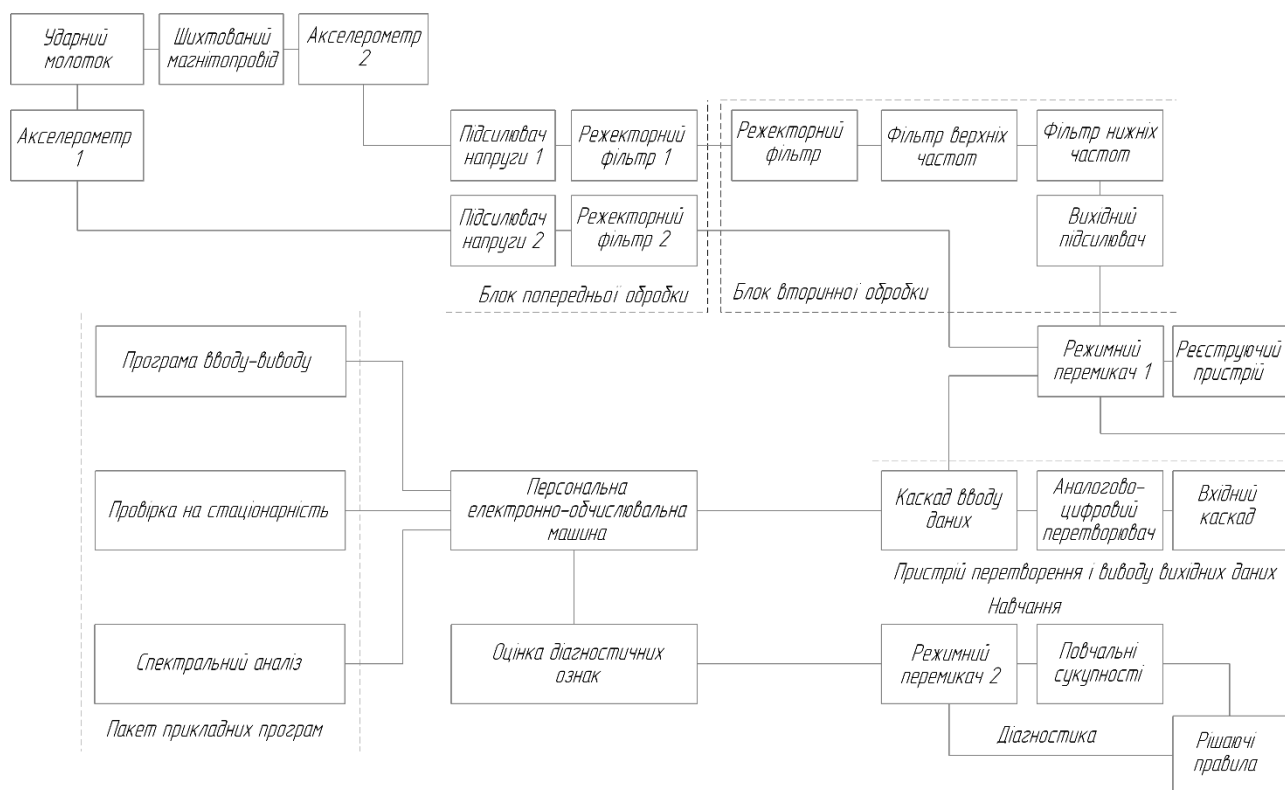


Рис. 3.1 Структурна схема системи

Склад макету:

- ударний молоток УМ;
- вимірювальні датчики (акселерометри) А1, А2;
- блоки аналогової обробки вібраційного сигналу БПО, БВО;
- режимні перемикачі РП1, РП2;
- реєструючий пристрій РП;
- пристрій перетворення і вводу сигналу ППВД;
- ЕОМ
- пакет прикладних програм ППП.

В якості об'єкту дослідження використовується макет магніторпроводу ШМ, який являє собою набірний пакет з пластин магнітострикційної сталі, які застосовуються в малопотужних трансформаторах.

Опис схеми. Апаратний склад системи, представленої на рис. 3.1. Розглянемо детальніше складові частини системи.

В якості перетворювачів пружних коливань використовуються акселерометри $A1$, $A2$ типу АВС-017.

Для збудження вібраційної хвилі в $ШМ$ служить ударний молоток $УМ$, який оснащений металічним бойком, зображений в графічній частині.

Спеціальний сплав, із якого виготовлений боек, дозволяє запобігти ефекту дриблінгу при ударі по магнітопроводі і забезпечує при цьому короткий по тривалості із значною амплітудою удар. Матеріал головки бойка, а також сила удару створює вагомий вплив на характер пружної хвилі, яка розповсюджується в $ШМ$. Ці питання досить детально оглянуті в описанні ударного молотка 8202, аналогічного до застосованого в розглядуваній системі.

В конкретному випадку в якості дії отримується деяка схожість δ -імпульсу, що дозволяє створювати пружну хвилю з рівномірним спектром частот в широкому діапазоні. Таким чином, виміряний відгук досліджуваного магнітопроводу на застосовувану дію дозволяє після відповідної обробки визначити власні характеристики $ШМ$. Пружні коливання перетворюються в електричний сигнал акселерометром $A2$, який встановлений на $ШМ$ з протилежної сторони до місця нанесення удару.

На $УМ$ з протилежної сторони від бойка за допомогою різьбового з'єднання закріплений акселерометр $A1$, який реєструє коливання, які розповсюджуються в тілі молотка після удару. Сигнал з $A1$ в подальшому використовується для запуску системи.

Для попередньої обробки досліджуваних сигналів вібрацій розроблений, виготовлений і налаштований пристрій попередньої обробки вібрацій. Конструктивно пристрій виконаний в вигляді двох блоків – блоку попередньої обробки $БПО$ і блоку вторинної обробки $БВО$. $БПО$ має два ідентичні канали, які складаються з:

- підсилювачів напруги $ПН1$, $ПН2$ з високим входним опором $R_{вх} = 1$ гОм і коефіцієнтом підсилення по напрузі 10 Дб;
- режекторних фільтрів $РФ1$, $РФ2$, які підключаються в випадку необхідності, з частотою режекції 50 і 100 Гц.

Блок живлення *БПО* виконаний по схемі перетворювача напруги і забезпечує перетворення постійної напруги 27 В в змінну з частотою 20 кГц, яка потім випрямляється і стабілізується. В результаті для живлення *БПО* отримується стабілізована напруга 5 і -15 В. Застосування такого перетворювача забезпечує гальванічну розв'язку підсилювача по колі живлення.

Блок вторинної обробки *БВО* складається із:

- режекторних фільтрів *РФ*, настроєних на частоти 50 і 100 Гц з глибиною режекції порядку 40 дБ;
- фільтрів верхніх частот *ФВЧ* з верхніми частотами 0,5; 1; 5; і 10 кГц. Затухання *ФВЧ* в смузі загородження складає приблизно 45 дБ/окт, а затухання в перехідній смузі – 36 дБ/окт;
- фільтрів низьких частот *ФНЧ* з верхніми граничними частотами 2, 4, 5 і 10 кГц;
- вихідного підсилювача *ВП*, який дозволяє підсилювати сигнал на 0, 10, 20, 30, 40 дБ.

Використання систем *ФНЧ* і *ФВЧ*, які переключаються, дозволяє сформувати потрібну смугу частот для дослідження вібраційних хвиль, які розповсюджуються в досліджуваному магнітопроводі.

Аналоговий сигнал, який пройшов через *БПО* і *БВО* може бути або зареєстрований з допомогою *РП*, або безпосередньо в реальному часі перетворитися в цифровий код і потім оброблятися на ЕОМ. Це забезпечується за допомогою режимного перемикача *РП1*.

Перетворення аналогових сигналів в цифровий код – потрібна умова для наступної їх обробки на ЕОМ. Розроблений і виготовлений пристрій перетворення і вводу вихідних даних ППВД призначений для роботи в комплексі з ЕОМ. Як видно з рис. 6, ППВД складається з:

- вхідного каскаду *ВК*, який являє собою підсилювач з дискретним змінням коефіцієнту підсилення в 1, 2, 4, 8 раз;

- 12 розрядного аналого-цифрового перетворювача *АЦП*, який забезпечує перетворення вхідного сигналу в цифровий код з частотою дискретизації до 250 кГц. Межі зміни сигналу на вході *АЦП* – від -5 до 5 В;

- Каскаду вводу даних *КВД*, який забезпечує узгодження виходу *АЦП* з системною шиною ЕОМ і ввід оцифрованого сигналу в оперативну пам'ять ЕОМ.

Конструктивно *ППВД* виконано в вигляді окремої плати, яка під'єднана до ЕОМ безпосередньо через з'єднувач системної шини.

Крім описаних технічних засобів для забезпечення функціонування системи спеціально розроблені програмне і інформаційно-довідкове забезпечення. Програмні засоби умовно можна поділити на дві частини: програму керування вводом-виводом і програми, які реалізують статистичний аналіз досліджуваної вібрації.

Програма вводу-виводу забезпечує:

- ввід оцифрованого сигналу в ЕОМ;
- вивід даних в графічному чи цифровому вигляді на екран монітора;
- запис даних з носіїв інформації;
- зчитування даних з носіїв інформації;
- керування об'ємом вибірки оцифрованого сигналу.

Програми статистичного аналізу виконують перевірку оцифрованого сигналу на стаціонарність і статистичний спектральний аналіз вібрацій магнітопроводу по алгоритмах, які були описані раніше.

В склад інформаційно-довідкового забезпечення входять методичні сукупності (МС), які відповідають різним технічним станам діагностованих магнітопроводів, рішення правила (РП) по діагностуванню і класифікації деяких дефектів магнітопроводу і блок оцінки діагностичних ознак (ОДО), який може використовуватися або для формування МС, або для діагностики стану магнітопроводу. Перехід від режиму навчання до режиму діагностики здійснюється за допомогою режимного перемикача *РП2*. Розглянемо принцип роботи системи.

Принцип роботи системи. Як було відмічено вище, вібраційна хвиля досліджуваного магнітопроводу збуджується ударним молотком УМ. Пружні коливання магнітопроводу перетворюються в електричний сигнал акселерометром *A2*. Одночасно з виникненням сигналу на *A2* виробляється сигнал запуску, який знімається з *A1*. Обидва сигнали подаються на вхід *БПО*.

Пройшовши *ПН1* і *РФ1*, попередньо підсилений вібраційний сигнал поступає на *БВО*, де з допомогою фільтрів *ФВН* і *ФНЧ*, які перестроюються формується частотний діапазон досліджуваних вібрацій. Далше сигнал через *ПС* подається на режимний перемикач *РП1*, з допомогою якого проводить комутація на реєструючий пристрій *РП* або на *ППВД*.

Сигнал запуску через *ПН2* і *РФ2* поступає на *РП1* і записується паралельно з досліджуваними вібраціями на *РП* або поступає на *КВД*, де вироблюється команда “початок перетворення”. Таким чином, в *ППВД* починається перетворення вібраційного сигналу в цифровий код і завантаження посліднього під керування програми вводу-виводу в оперативну пам'ять ЕОМ.

Описаний макет системи дозволив провести ряд експериментів по діагностиці степені пресування магнітопроводу, результат яких приведені в наступному пункті.

3.2 Експериментальна перевірка степені пресування магнітопроводу

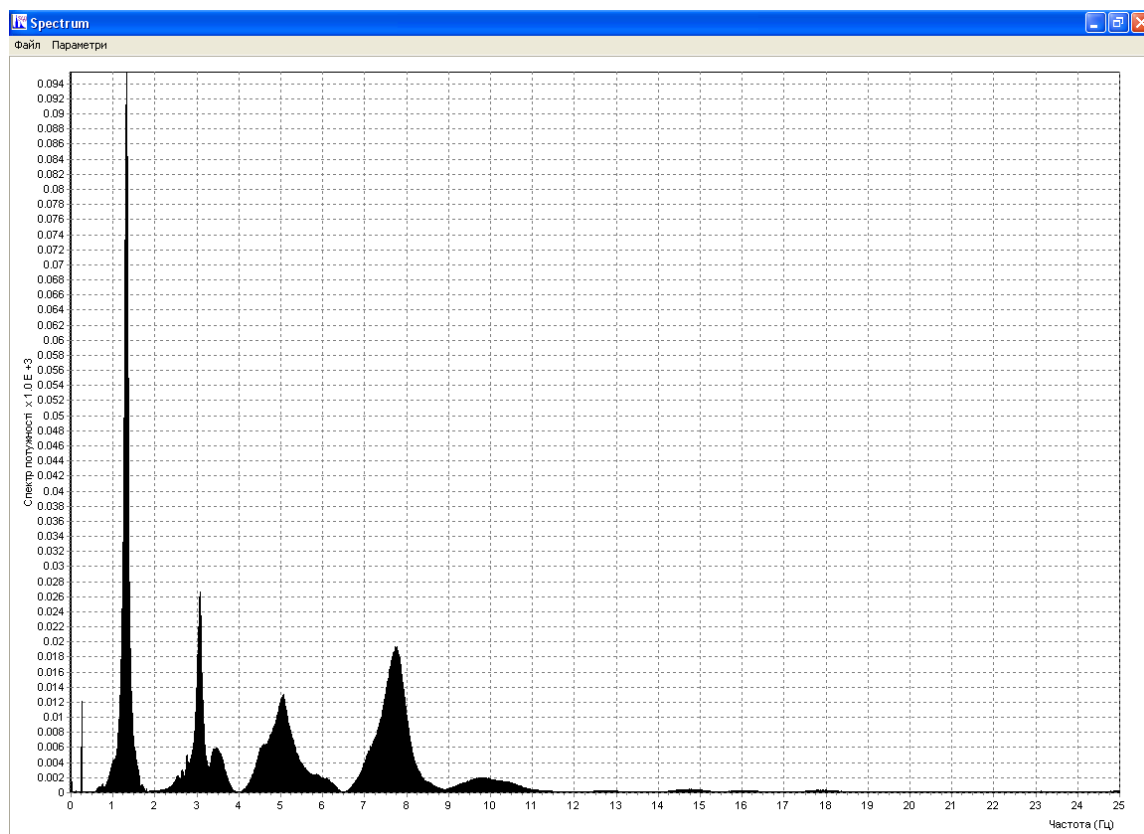
З використанням описаного макету системи і пакету прикладних програм, який входить в цей макет, були проведені експерименти по діагностиці стану пресування магнітопроводу. У якості об'єкту дослідження використовувався магнітопровід малопотужного трансформатора, зображений в графічній частині.

Затяжка шпильок проводилася динамічним ключем з моментом 30 Н·м. Вібраційний сигнал (віброприскорення) вимірювався з використанням акселерометру 2, що встановлювався із допомогою спеціального клею. Використовуваний акселерометр типу АВС-17 дозволив виміряти в смузі

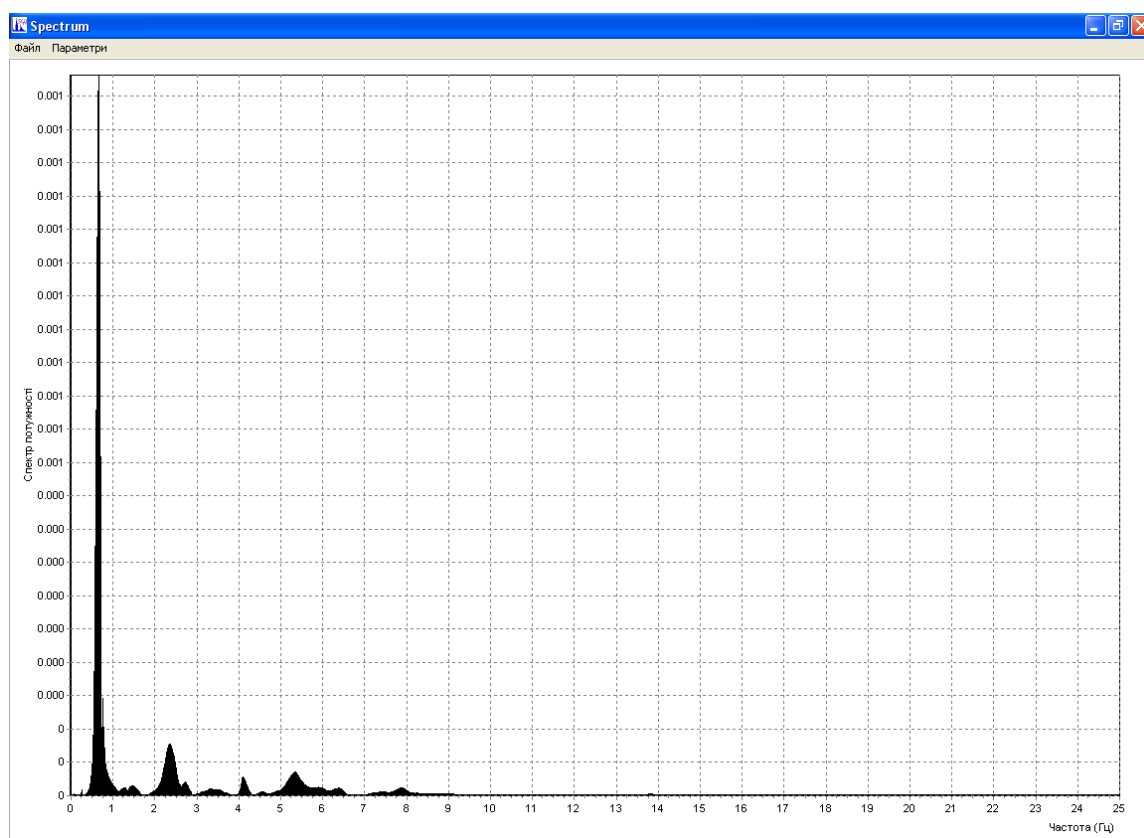
частот 20 Гц – 30 кГц вібраційну хвилю, яка збуджувалася ударним молотком в тілі магнітопроводу.

Експеримент по діагностуванню. Із використанням зажимних гайок, що встановлювалися на шпильках стискалися пластини магнітопроводу сухого трансформатору. Потім включався та настроювався макет системи. Після настройки макету в напрямку, перпендикулярному до площини пластин, здійснювався удар, що фіксував акселерометр $A1$, встановлений на молотку. Сигнал з акселерометра $A1$ поступав на схему запуску макету системи і проводився замір акселерометром $A2$ вібраційного сигналу, який виникає після удару молотком по магнітопроводі.

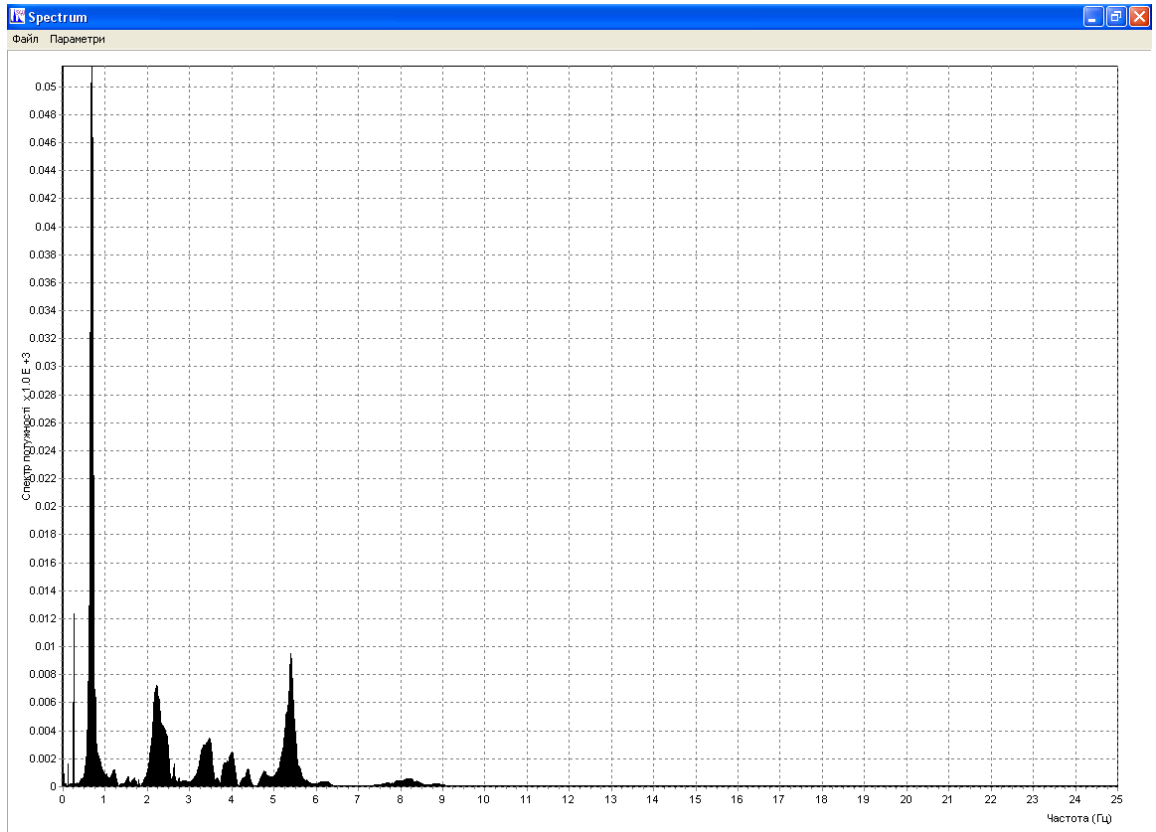
Після цього відпускалися гайки шпильок, за допомогою яких стягувалися пластини магнітопроводу, і відповідно повторявся експеримент, аналогічний описаному. На рис. 3.2 зображені спектрограми, які були виміряні на магнітопроводі, зжатому (рис. 3.2, *а,б,в,г*), і в випадку, коли зжимаюча сила повністю знята (рис. 3.3, *а,б,в,г*):



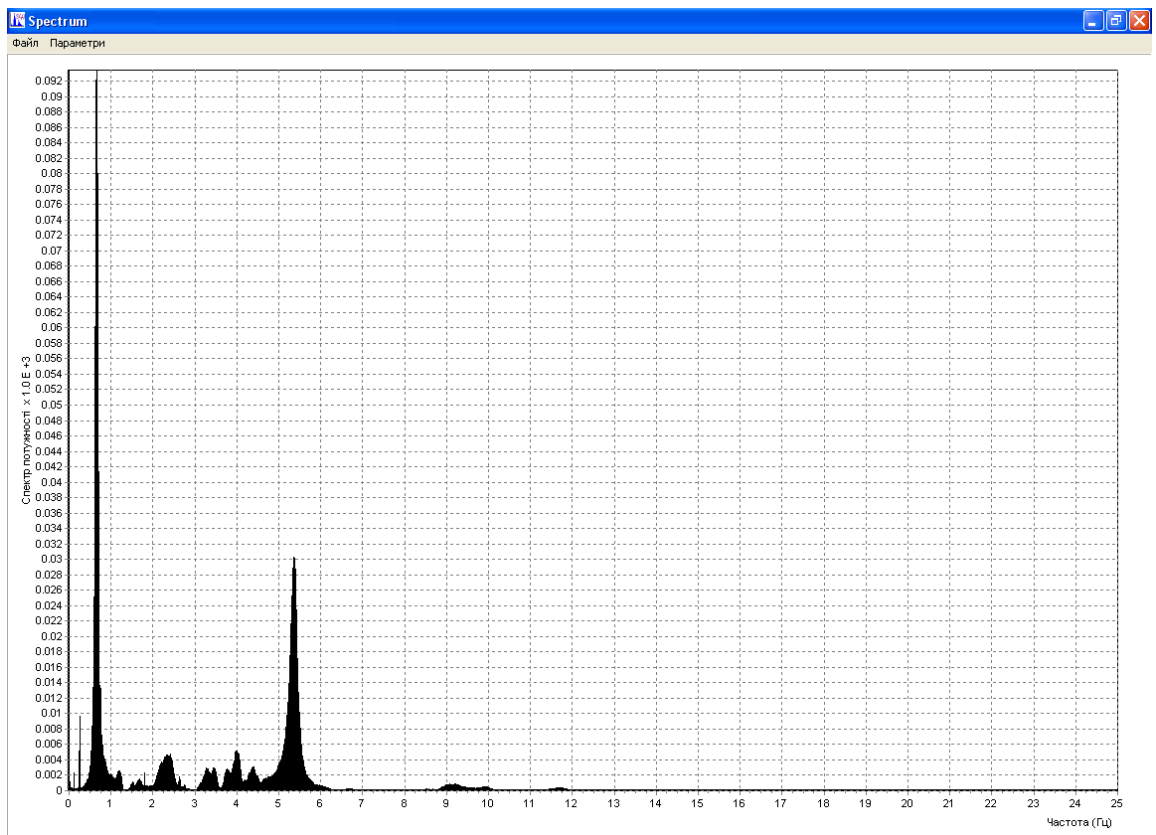
a)



б)

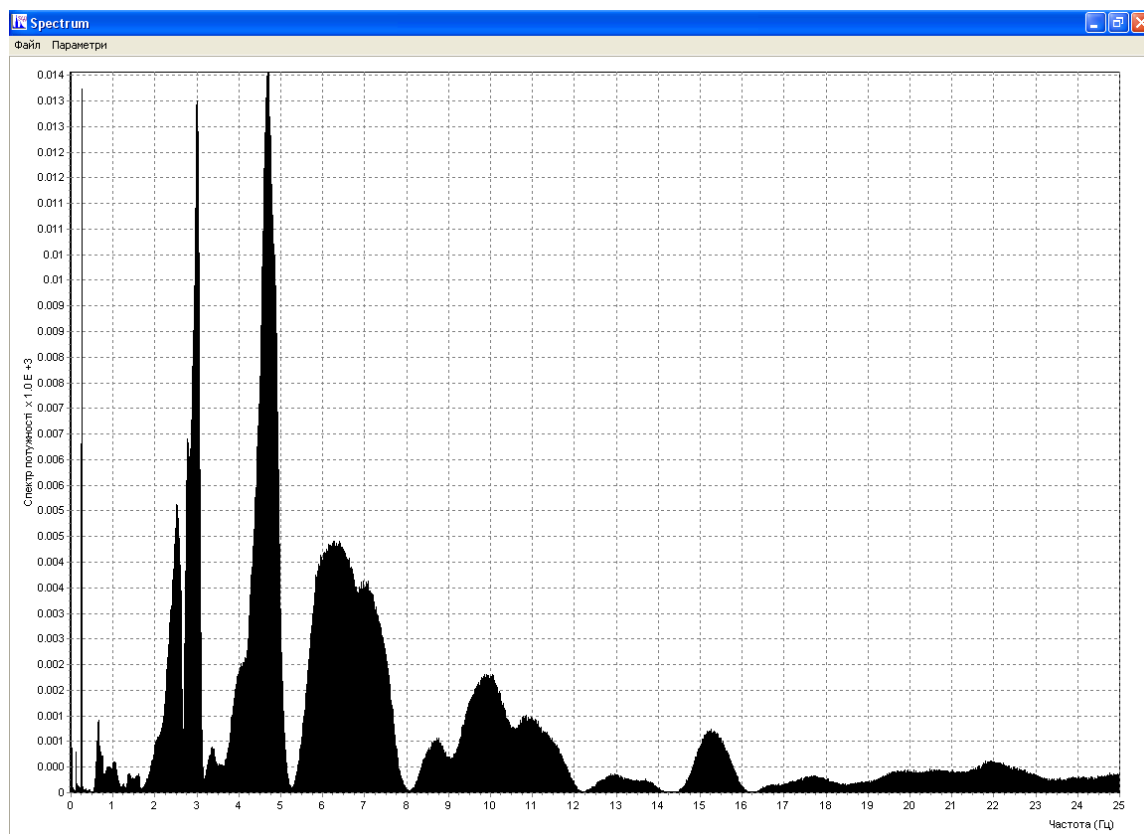


B)

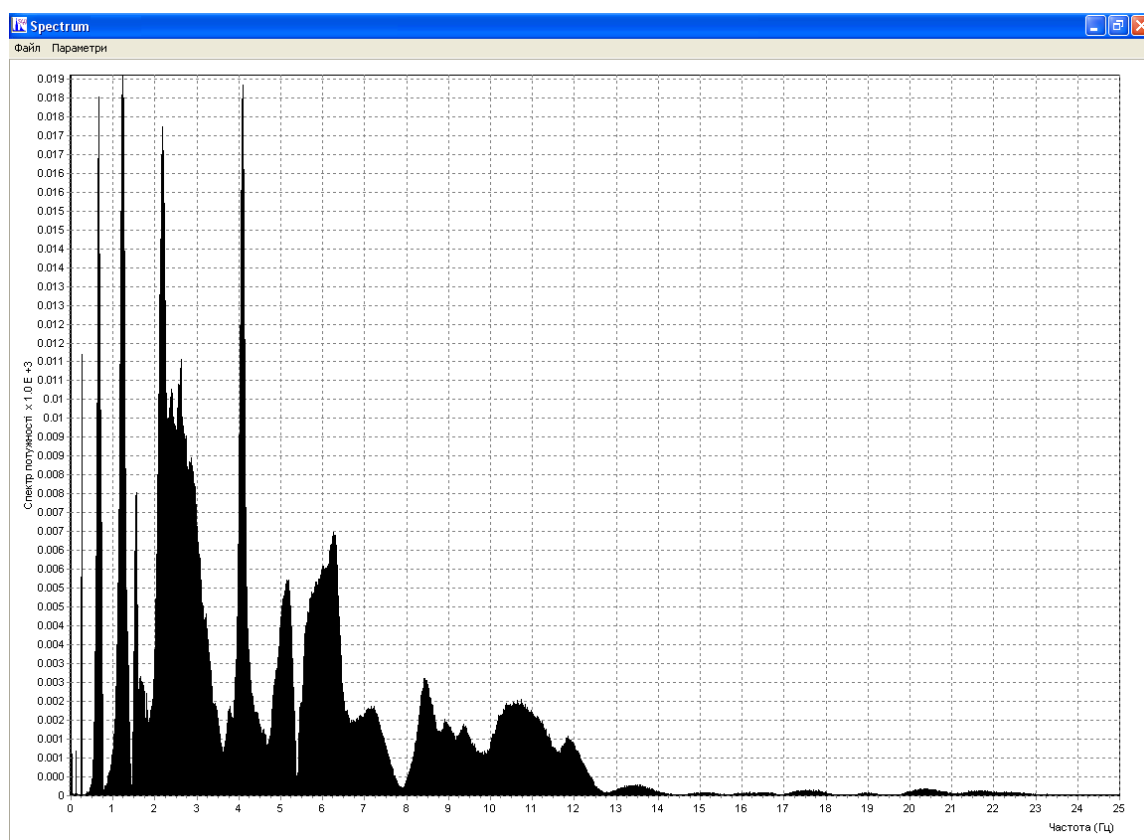


Г)

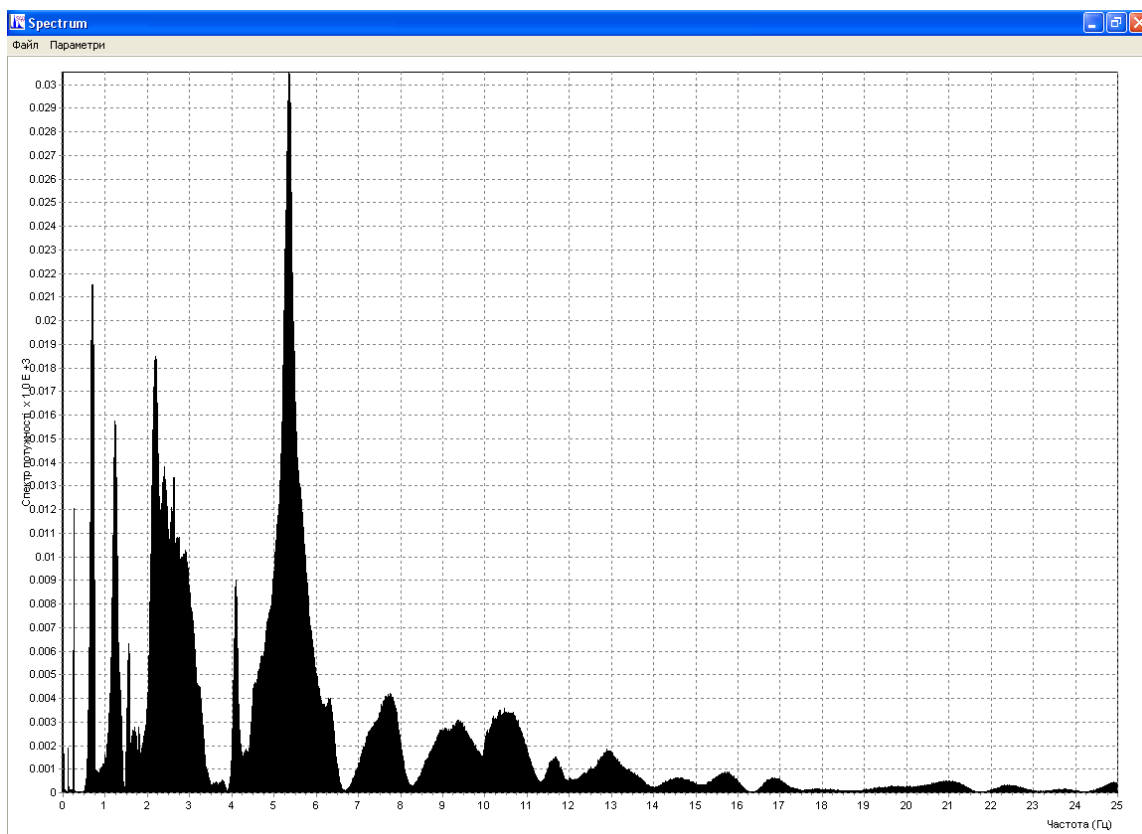
Рис. 3.2 Спектрограми, виміряні на зжатому магнітопроводі



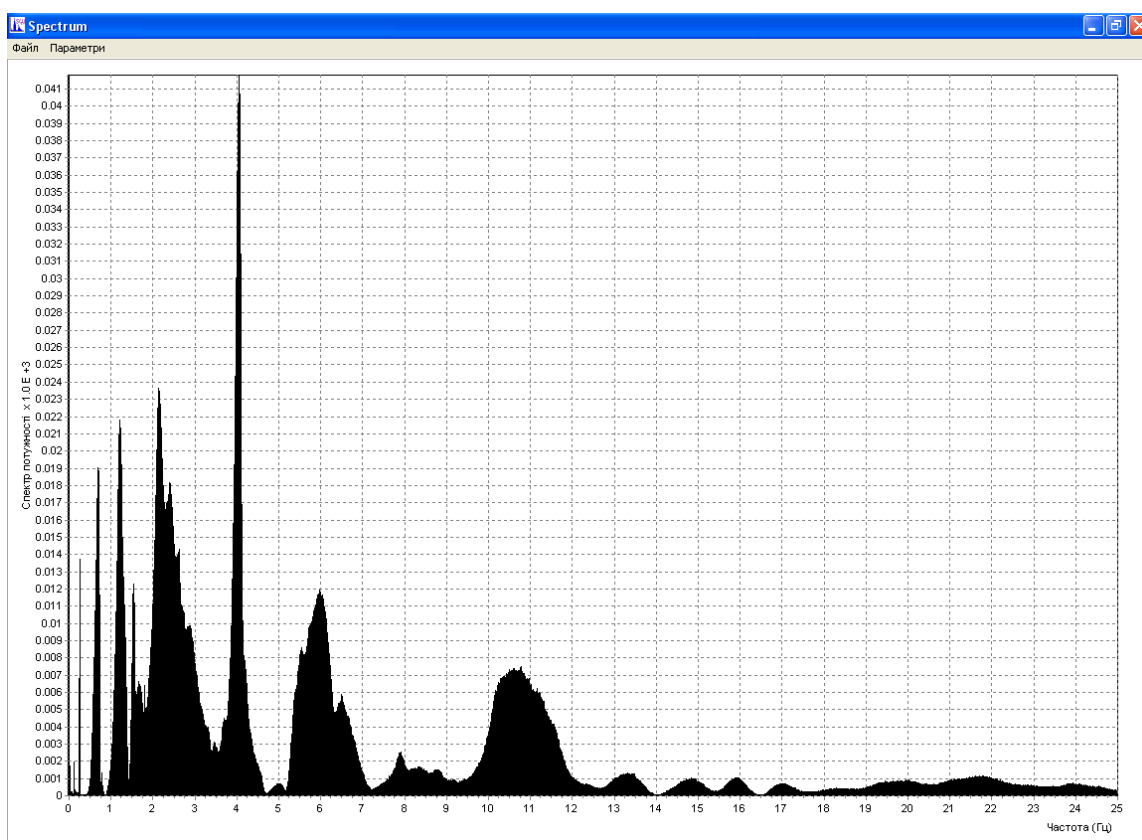
a)



б)



В)



Г)

Рис. 3.3 Спектрограми, виміряні на розжатому магнітопроводі

При проведенні цих експериментів аналоговий вібраційний сигнал перетворювався в цифровий код з частотою дискретизації $f_d = 10$ кГц.

Із рис. 3.2 можна зробити висновок, що для зжатого магнітопроводу силового трансформатору основна частота вібрацій спостерігається у області 600 Гц. Також можна відмітити менш інтенсивні складові у області 2300 Гц та 5400 Гц.

При знятті стягуючого зусилля у спектрограмі вібрацій магнітопроводу (рис. 3.3) окрім основної частоти у області 600 Гц можна відмітити інтенсивні частотні складові практично на всій аналізованій смузі частот 25 кГц. Так багаторезонансна структура вібрацій у магнітопроводі з ослабленим пресуванням пояснюється вібраціями окремих пластин, які створюють цей магнітопровід.

Таким чином, проведені експерименти підтвердили теоретичні припущення, що в якості діагностичних ознак стану пресування магнітопроводу можуть бути використані амплітуди та частоти основних максимумів, і також число основних частотних максимумів в фіксованій смузі частот.

3.3 Побудова методики по діагностиці ступеня пресування магнітопроводу

Результати, викладені в попередніх пунктах, дали можливість теоретично обґрунтувати і експериментально перевірити діагностичні ознаки, які дозволяють діагностувати стан пресування магнітопроводу. Серед них найбільш інформативним являються ознаки, отримані з використанням статистичного спектрального аналізу, а саме: амплітуди, частоти, а також число максимумів спектрограми в фіксованій смузі частот.

Розглядувані нижче методи діагностування магнітопроводів базуються на класичних методах перевірки статистичних гіпотез з використанням лінійних випадкових процесів. Основної уваги при розробці цих методів наділено

дослідженню методичних сукупностей, сформованим за спектральними діагностичними признаками у відповідних діагностичних просторах, які дозволяють з наперед заданими ймовірностями помилок першого і другого роду встановити ступінь пресування магнітопроводу.

3.3.1 Формування методичних сукупностей

Задача статистичної діагностики включає елементи:

- джерело діагностичної інформації;
- попередню статистичну обробку;
- вибір простору дослідження;
- побудова рішачих правил.

Джерело створює процес, який залежить від діагностичних параметрів, кожен з яких представляє собою вектор чи скаляр. Розглядується один параметр, що може приймати два різних значення. Кожному з цих значень відповідає одна гіпотеза: основна H_0 і конкуруюча H_1 .

Попередня статистична обробка будується так, як ніби вже відомо, яка гіпотеза являється істинною. Получається досить визначена точка в просторі спостереження. Вважається, що при проведенні обробки добавляється деяка незалежна від гіпотез адитивна випадкова компонента. Вона спотворює значення діагностованого параметру, тому з кожним гіпотетичним значенням параметра зв'язується імовірнісний закон розподілу, який однозначно відповідає кожній із згаданих гіпотез.

Простір спостережень включає в себе всі можливі значення вимірюваних параметрів, які вони можуть приймати в процесі експерименту. В результаті дії перешкод в просторі спостереження множини точок, які відповідають різним гіпотезам, пересікаються, а іноді і повністю співпадають. У зв'язку із цим проводить розбиття простору спостереження на непересікаючі підмножини спостереження – образи, які відповідають кожній із гіпотез.

Кінцевим етапом при проведенні діагностики являється побудова рішального правила. Це правило будується з врахуванням методичних сукупностей і представляє собою оптимальне розбиття деяким чином перетвореного простору спостереження на неперетинаючі підмножини.

Оскільки питання, зв'язані з описом джерела діагностичної інформації, а також з попередньою статистичною обробкою, були розглянуті вище, зупинимось детальніше на навчанні і формуванні образів (методичних сукупностей).

Методичні сукупності представляють собою множини тих значень параметрів, які відповідають умовно придатному стану діагностованого вузла чи його стану, зв'язаному з наявністю одного із діагностованих дефектів.

Зупинимось на побудові методичних сукупностей, які відповідають різній степені пресування досліджуваного магнітопроводу. В попередніх пунктах були теоретично обґрунтовані і експериментально перевірені діагностичні ознаки, кількісні оцінки яких можуть бути отримані з допомогою статичного спектрального аналізу. В результаті такого аналізу ударної вібраційної хвилі енергетичний спектр, який визначається, характеризується розподілом такої хвилі по частотам.

Виходячи із розгляду спектрограм ударних вібраційних хвиль, які розповсюджуються по тілі магнітопроводу (типові із них представлені на рис. 3.2, рис. 3.3), можна відмітити, що найбільш інформативними діагностичними ознаками, які дозволяють діагностувати степінь пресування магнітопроводу, являються:

- амплітуди основних максимумів спектрограм;
- частоти основних максимумів спектрограм;
- число основних максимумів спектрограм в фіксованій смузі частот.

Пояснимо на прикладі спектрограм, представлених на рис. 3.2, рис. 3.3, яким чином відбувається формування методичних сукупностей по результатам спектрального аналізу. І так, при збудженні ударним молотком магнітопроводу зжатого з силою 30 Н·м, на спектрограмі його вібрацій можна виділити три

основних максимуми частоти: в областях 600, 2300 і 5400 Гц. При знятті зжимаючого зусилля крім основних максимумів в спектрограмі появляються частотні складові по всій досліджуваній смузі частот (до 25 кГц). Зупинимося на цих результатах спектрального аналізу, в якості діагностичного признаку, який будемо використовувати для побудови методичних сукупностей, виберемо число основних максимумів спектрограми в фіксованій смузі частот. Кількість максимумів спектрограми, які будуть враховуватися при формуванні навчальних сукупностей, будемо визначати на рівні 0,5 максимального значення. Виходячи з вибраного діагностичного признаку, формування методичних сукупностей здійснимо у одновимірному діагностичному просторі $\mathcal{S}$.

Із рис. 3.2 видно, що на рівні 0,5 відмічається один максимум спектрограми, який відповідає вібраціям магнітопроводу, спресованого з силою 30 Н·м. В той же час на спектрограмі рис. 3.3 відповідаючі вібраціям магнітопроводу, у якого зжимання зусиль відсутнє, на рівні 0,5 відмічається уже 7 максимумів.

Рівень 0,5, по якому фіксується кількість максимумів спектрограм, вибраний довільно для простоти підрахунку цих максимумів. Аналіз кожної із спектрограм дає в вибраному діагностичному просторі по одній точці, яка відповідає різній ступені пресування магнітопроводу.

Для побудови методичних сукупностей в діагностичному просторі $\mathcal{S}$ було проведено 5 експериментів для дослідження вібрацій магнітопроводу, збудженого ударним молотком. Ці експерименти проводилися спочатку на магнітопроводі, зжатому з зусиллям 30 Н·м, а потім на магнітопроводі з знятим стягуючим зусиллям. Перед проведенням наступного спектрального аналізу всі отримані реалізації вібрацій перевірялися на стаціонарність з використанням t і F -критеріїв, розглянутих раніше. Стаціонарні в смислі t і F -критеріїв реалізації використовувалися для побудови методичних сукупностей. На рис. 3.4 приведені методичні сукупності, побудовані по результатам аналізу спектрограм вібрацій використовуваного магнітопроводу.

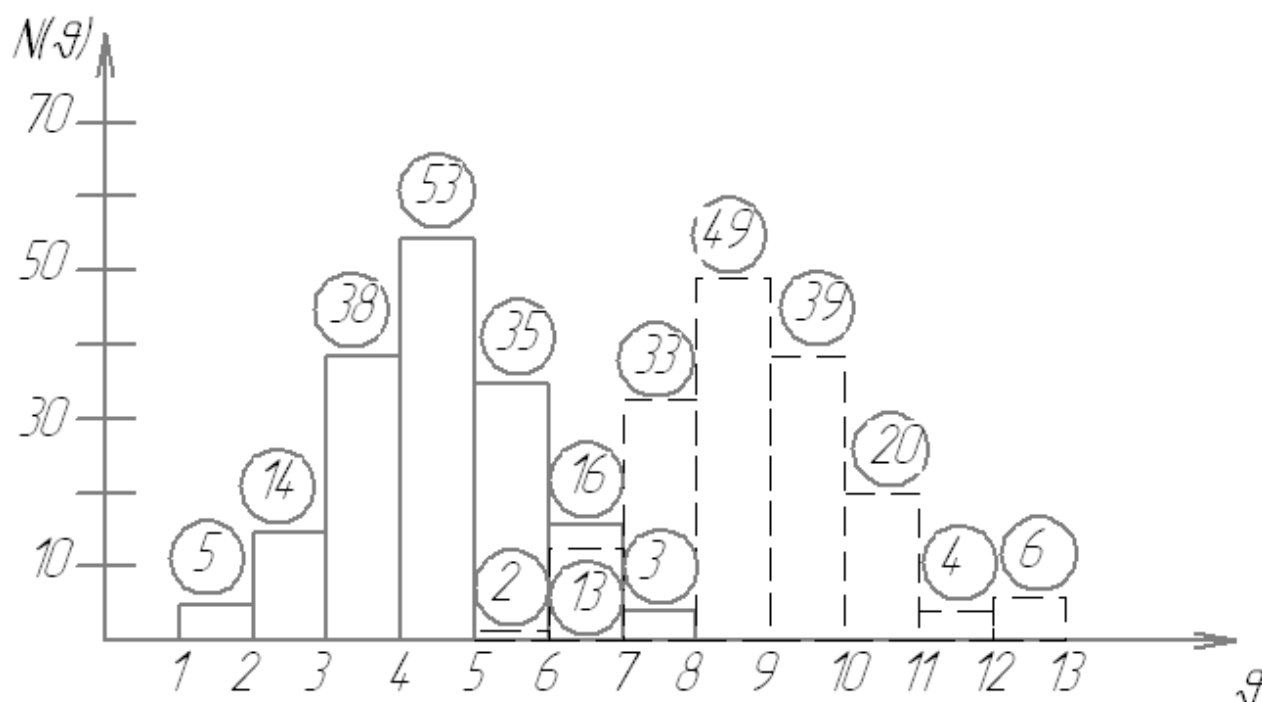


Рис. 3.4 Методичні сукупності

Побудова згладжених кривих передбачена в програмі гістограмного аналізу.

На рис. 3.5 показані криві, згладжуючі гістограми усередненого числа g максимумів спектрограм вібрацій магнітопроводу. Ці криві являються методичними сукупностями в одновимірному діагностичному просторі g . Розподіл числа g , як відповідають різним зусиллям пресування магнітопроводу, мають різні математичні сподівання: $\Theta_1 = 4,47$ та $\Theta_2 = 8,78$.

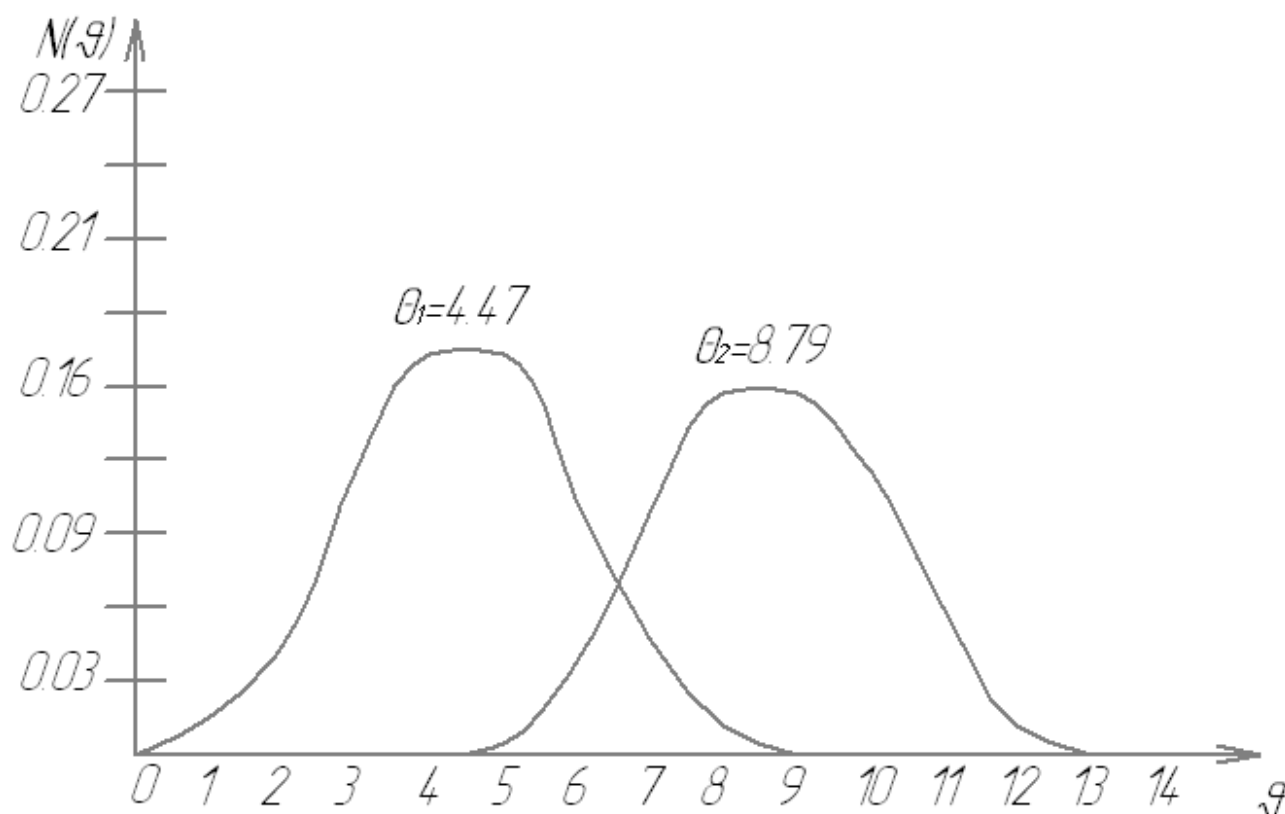


Рис. 3.5 Криві, згладжуючі гістограми

Сформувавши методичні сукупності, перейдемо безпосередньо до побудови рішачих правил по діагностиці зусиль пресування магнітопроводів.

3.3.2 Вибір статистичних критеріїв

Запропоновані Непманом і Пірсоном рішачі правила вибору гіпотез в двухальтернативній ситуації спираються на однопороговому аналізі логарифма відношення правдивості і фактичного зводиться до оптимального вибору деякого порогу C , який розділяє множину допустимих значень відношення правдивості на дві підмножини, які не пересікаються. Іншими словами, основним моментом в цій задачі являється вибір на множині допустимих значень відношення правдивості деякого порогу C , для якого при заданому значенні помилка першого роду α , фіксованому об'ємі вибірки n і

найменшому значенні помилки другого роду β , яка із двох гіпотез має місце, - основна H_0 чи альтернативна H_1 .

В результаті перетворення логарифму відношення правдивості отримаємо нерівність:

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \leq C \quad (3.1)$$

на основі рішення якого приймається основна чи конкуруюча гіпотеза. В нерівності (3.1) $x_k, k = \sqrt{1, n}$ - реалізація вибірки $\xi_k, k = \sqrt{1, n}$, а C - поріг, який визначається за виразом:

$$C = \frac{(\Theta_1 - \Theta_2)(U_\alpha - U_\beta)}{2(U_\alpha + U_\beta)} + \frac{1}{2}(\Theta_1 + \Theta_2) \quad (3.2)$$

Підставляючи результати вимірів, отриманих при проведенні експериментів, в (3.1), робимо висновок, яка із гіпотез має місце. Якщо нерівність (3.1) не виконується, то приймається гіпотеза H_1 .

Для діагностики степені пресування магнітопроводу побудуємо двохальтернативне рішення правило, яке зводиться до перевірки гіпотез $H_0 : \Theta_1 = 4.47$ (магнітопровід спресований з силою 30 Н·м) проти $H_1 : \Theta_2 = 8.78$ (стягуюче зусилля в магнітопроводі відсутнє).

І так, проведемо перевірку основної гіпотези H_0 проти простої альтернативи H_1 .

Необхідне число спостережень s врахуванням того, що $U_{1-\alpha} = -U_\alpha$, $U_{1-\beta} = -U_\beta$,

$$N = \frac{(U_\alpha + U_\beta)^2 \sigma^2}{(\Theta_1 - \Theta_2)^2} = \frac{15.769 \cdot 4.36}{(4.31)^2} = \frac{68.75}{18.58} = 3.7 \approx 4$$

Для розглядуваної задачі $\sigma = 2.09$.

Величина порогу:

$$C = \frac{(\Theta_1 - \Theta_2)(U_\alpha - U_\beta)}{2(U_\alpha + U_\beta)} + \frac{1}{2}(\Theta_1 + \Theta_2) = -\frac{2.935}{7.942} + 6.625 = 6.255$$

Таблиця 3.1 - Отримані значення за параметрами спостереження

Параметр спостереження	Номер досліджуваного магнітопроводу				
	1	2	3	4	5
	Магнітопровід, спресований з силою 30 Н·м				
ϑ_1	3	5	4	3	5
ϑ_2	1	3	4	4	6
ϑ_3	1	5	3	3	4
ϑ_4	2	5	4	2	4
$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \xi_j$	1,75	4,5	3,75	3	4,75
ϑ_1	Магнітопровід без стягуючого зусилля				
	8	11	6	9	7
ϑ_2	7	8	7	10	9
ϑ_3	7	9	8	10	9
ϑ_4	6	8	7	11	9
$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \xi_j$	6,75	9	7	10	8,25

Потім проведені експерименти по вимірюванню і обробці вібрацій, викликаних ударною дією, по всім п'яти досліджуваним магнітопроводам. Оцінка значення параметрів ϑ вібрацій досліджуваних магнітопроводів приведена в таблиці 3.1. Після підстановки даних із таблиці в вираз (3.1) його

ліва частина для 1-го – 5-го зразків досліджуваних магнітопроводів приймає значення, рівні 6,75; 9; 7; 10; 8,25, тобто, для всіх п'яти зразків ліва частина нерівності (3.1) більша правої, тому приймається гіпотеза H_1 - в магнітопроводах відсутня стягуюча сила.

І так, з розглянутого прикладу слідує, що число максимумів спектрограм вібрацій магнітопроводу може використовуватися в якості діагностичного признаку для визначення степені його пресування. Відносна частота застосування розглядуваних вище рішеннячих правил в комплексі з макетом системи робить придатним для практичного використання спосіб ударної діагностики магнітопроводів.

3.4 Висновки до розділу

1. Розроблено макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів, який забезпечує збудження, реєстрацію, аналогову та цифрову обробку вібраційних сигналів магнітопроводу при ударному збудженні, а також реалізує алгоритми статистичного спектрального аналізу для визначення технічного стану пресування магнітопроводу.

2. Проведено експериментальні дослідження на макеті магнітопроводу, виготовленого з магнітострикційної сталі, які підтвердили можливість використання ударного методу для діагностики стану пресування. Встановлено, що у випадку зжатого магнітопроводу основна частота вібрацій близько 600 Гц, тоді як при ослабленні пресування з'являється значна кількість додаткових частотних складових у діапазоні до 25 кГц.

3. Визначено основні діагностичні ознаки стану пресування магнітопроводу: амплітуди, частоти та кількість максимумів спектрограм у фіксованій смузі частот. Саме ці параметри є найбільш інформативними при оцінюванні технічного стану пресування.

4. Побудовано методику формування методичних сукупностей у діагностичному просторі за спектральними параметрами, що дозволяє

здійснювати навчання системи та подальше автоматичне розпізнавання станів магнітопроводу.

5. Розроблено та реалізовано двохальтернативне рішення для визначення стану пресування магнітопроводу на основі критеріїв Неймана-Пірсона, що забезпечує мінімізацію імовірностей помилок першого та другого роду.

6. Приведені експерименти підтвердили ефективність застосування розробленого макету та методики спектрального аналізу для діагностики стану магнітопроводу силових трансформаторів. Отримані результати доводять можливість практичного використання запропонованого способу ударної діагностики у системах технічного обслуговування трансформаторного обладнання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Вплив вібрації на організм людини і розроблення заходів щодо зниження його рівня

Вібрація приводить тіло або його структурні одиниці в коливальний рух. Розрізняють поперечні, поздовжні або крутильні коливання. Залежно від дії на людину вібрації ділять на місцеві і загальні. Загальні вібрації викликають шок в людини, місцеві залучають до коливальних рухів лише окремі частини тіла.

Загальна вертикальна вібрація викликає численні реакції в організмі людини. Ступінь дії вібрації характеризується:

- а) станом основних нервових процесів в центральній нервовій системі (збудження і гальмування);
- б) реакціями з боку серцево-судинної системи (змінami серцевої діяльності);
- в) загальним станом: стомленням, появою болю і інших неприємних відчуттів (жару, нудоти, відчуття трясіння внутрішніх органів і т.д.). Вібрації викликають неприємне відчуття, яке найчастіше виявляється при резонансних для організму частотах.

Місцеві вібрації викликаються дією, головним чином, ручного механізованого інструменту. Вібрації частотою 35-250 Гц і вище розвивають вібраційну хворобу із спазмом (звуженням) кровоносних судин кінцівок.

Вимірювання рівня вібрації і дослідження його характеристик є основними в рішенні питань боротьби з вібрацією будь-якого виду устаткування приладів і апаратів. Вимірювання вібрацій виконують в такій послідовності:

- виявляють найбільш вібраційні вузли і вимірюють спектри на робочих місцях (в устаткування, пультах управління і т.п.);
- визначають тривалість дії вібрації на обслуговуючий персонал;

- значення вимірних рівня вібрації порівнюють з допустимими значеннями і з'ясовують ступінь їх відповідності.

Найнадійнішим і дешевим методом боротьби з вібрацією є використання пружинних, гумових або комбінованих амортизацій.

Якщо конструктивними, технологічними і будівельно-планувальними заходами неможливо понизити рівень вібрації до гранично допустимих значень, застосовують індивідуальні засоби захисту.

Вібробезпечні умови праці забезпечують:

- застосування засобів вібраційного захисту які зменшують вібрацію, що впливає на шлях його розповсюдження;
- проектувальне вирішення технологічних процесів і виробничих приміщень;
- організація технологічними заходами.

Як індивідуальні засоби захисту від вібрації, що передається від інструменту на руку, застосовують антивібраційні рукавиці. Найпростіша конструкція рукавиць — шкіряні рукавички з прокладками із губчастої гуми. При дії вібрації через ноги робоче місце повинно бути амортизовано килимками, робітника забезпечують віброзахисним взуттям.

При роботі модуля регулювання швидкості двигуна відбувається вібрація робочого місця. Тому потрібно використовувати засоби захисту (антивібраційні рукавиці, килимки і віброзахисне взуття).

4.2 Вплив електромагнітного поля на організм людини.

Електромагнітне поле (ЕМП) характеризується векторами напруженості електричного E (В/м) і магнітного H (А/м) полів. Вектори E і H біжучої електромагнітної хвилі завжди взаємно перпендикулярні. При розповсюдженні в провідному середовищі вони зв'язані відношенням:

$$E = H \sqrt{\frac{\omega \mu}{\gamma}} \cdot e^{-kz}$$

де φ — колова частота електромагнітних коливань;

γ – магнітна проникність цієї речовини;

k – коефіцієнт затухання;

Z – відстань від вхідної площини екрана до розглядуваної точки.

Вплив електромагнітних полів на людину залежить від напруженості електричного і магнітного полів, інтенсивності потоку енергії, частоти коливань, локалізації опроміненнь на поверхні тіла й індивідуальних особливостей організму.

Механізм цього впливу полягає в тому, що в електричному полі атоми і молекули, з яких складається людське тіло, поляризуються, а полярні молекули (наприклад води), крім того, орієнтуються по напрямку поширення електромагнітного поля. В електролітах, якими є рідкі складові тканин, крові, міжклітинної рідини, після прикладання зовнішнього поля з'являються іонні струми. Перемінне електричне поле викликає нагрівання тканин тіла людини як за рахунок перемінної поляризації діелектриків, так і за рахунок появи струмів провідності.

Тепловий ефект є наслідком поглинання енергії електромагнітного поля. Крім того, має місце відбивання електромагнітних хвиль від поверхні людського тіла через зміну на цій границі хвильового опору середовища.

Поглинання енергії і виникнення іонних струмів супроводжується специфічним впливом на біологічні тканини, оскільки порушується тонка структура електричних потенціалів і циркуляції рідини в клітинах і внутрішніх органах.

Змінне магнітне поле призводить до зміни орієнтації магнітних моментів атомів і молекул. Цей ефект слабше викликаний зовнішнім електричним полем, але він також небайдужий для організму.

Чим більша напруженість поля і чим більше час впливу, тим зазначені ефекти виявляються сильніше.

Підвищення частоти коливань приводить до збільшення провідності тіла, частки поглиненої енергії і зменшенню глибини проникання хвиль. Експерименти показали, що випромінювання з довжинами хвиль коротше 10 см

у значній мірі поглинається шкірою; випромінювання з довжинами хвиль 10-30 см поглинається в меншій мірі (на 30-40%), однак у цьому випадку поглинання відбувається переважно у внутрішніх органах. Таке випромінювання найбільш шкідливе.

Надлишкове тепло виділяється до певної межі шляхом збільшення навантаження на механізм терморегуляції. Починаючи з деякої величини ($j > 10$ мВт/см²), названої тепловим порогом, організм не справляється з відводом тепла, що утворюється, температура тіла підвищується, що приносить велику шкоду здоров'ю.

Поглинання найбільш інтенсивне в органах з великим вмістом води (кров, м'язи, легені, печінка). Опромінення очей викликає помутніння кришталика (катаракту). Звичайно катаракта розвивається не одразу, а через кілька днів чи тижнів після опромінення.

Крім теплового впливу на тканини людини, як на діелектричні матеріали, що володіють деякою провідністю, електромагнітні поля впливають на тканини, як на біологічні об'єкти. Вони безпосередньо впливають на нервову систему, змінюють орієнтацію клітин чи ланцюгів молекул відповідно до напрямку силових ліній електричного поля, біохімічну активність білкових молекул і склад крові. Порушуються функції серцево-судинної системи. Спостерігаються зміни вуглеводного, білкового і мінерального обміну речовин. Однак ці зміни носять функціональний, оборотний характер досить припинити опромінення неприпустимого рівня — і хворобливі явища зникають.

Гранично допустимі значення густини потоку енергії ЕМП у діапазоні частот 300 МГц ... 300 ГГц на робочих місцях персоналу визначають, виходячи з припустимого енергетичного навантаження на організм з урахуванням часу впливу.

4.3 Перша допомога людині при ураженні електричним струмом

Перша медична допомога — це комплекс заходів, спрямованих на відновлення або збереження здоров'я потерпілих, здійснюваних немедичними працівниками (взаємодопомога) або самим потерпілим (самодопомога). Найважливіше положенню надання першої допомоги — її терміновість. Чим швидше вона буде надана, тим більше сподівань на сприятливий результат.

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм уражаючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілого, оцінити його стан;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
- викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Рятувати потерпілого від впливу електричного струму залежить від швидкості звільнення його від струму, а також від швидкості та правильності надання йому допомоги.

При ураженні електричним струмом смерть часто буває клінічною, тому ніколи не слід відмовлятися від надання допомоги потерпілому і вважати його мертвим через відсутність дихання, серцебиття чи пульсу.

Весь персонал, що обслуговує установки, електричні станції, підстанції і електричні мережі, повинен не рідше одного разу на рік проходити інструктаж з техніки безпеки при експлуатації електроустановок, з надання першої медичної допомоги, а також практичне навчання з прийомів звільнення від електричного струму, виконання штучного дихання та зовнішнього масажу серця. Заняття

повинні проводити компетентні особи з медичного персоналу або інженери з техніки безпеки, котрі пройшли спеціальну підготовку і мають право навчати персонал підприємства наданню першої допомоги. Відповідальним за організацію навчання є керівник підприємства.

В місцях постійного чергування персоналу повинні бути:

- аптечка з необхідними пристосуваннями та засобами для надання першої медичної допомоги;

- плакати, присвячені правилам надання першої медичної допомоги, виконання штучного дихання та зовнішнього масажу серця, вивішені на місцях, що добре видні.

Дотик до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, викликає мимовільне судомне скорочення м'язів та загальне збудження, котре може призвести до порушення і навіть повного припинення діяльності органів дихання та кровообігу. Якщо потерпілий тримає провід руками, його пальці сильно стискаються, що звільнити їх від проводу стає неможливим.

У зв'язку з цим першою дією того, хто надає першу допомогу, повинне бути швидке вимкнення цієї частини електроустановки, до якої доторкається потерпілий. Вимкнення здійснюється за допомогою вимикача, рубильника або іншого апарату.

Якщо вимкнути установку швидко не можна, слід вжити заходів щодо звільнення потерпілого від струмоведучих частин, до яких від доторкається. У всіх випадках ураження той, хто надає допомогу, не повинен доторкатися до потерпілого без належних запобіжних заходів, оскільки це небезпечно для життя. Він також може бути ураженим електричним струмом.

При відділенні потерпілого від струмопровідних частин рекомендується діяти однією рукою. В усіх випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості, має стійке дихання, пульс, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстібнути його одяг, який утруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і

зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Коли потерпілий, який знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід йому дати випити 15–20 крапель настоянки валеріани і гарячою чаю.

В жодному разі не можна дозволяти потерпілому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після ураження не виключає можливості подальшого погіршення стану. Лише лікар може робити висновок про стан здоров'я потерпілого. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але у нього не порушується пульс, необхідно одразу зробити йому штучне дихання.

За відсутності дихання та пульсу у потерпілого внаслідок різкого погіршення кровообігу мозку розширюються зіниці, зростає синюшність шкіри та слизових оболонок. У таких випадках допомога повинна бути спрямована на відновлення життєвих функцій шляхом проведення штучного дихання та зовнішнього масажу (непрямого) масажу серця.

Потерпілого слід переносити в інше місце лише в тих випадках, коли йому та особі, що надає допомогу, продовжує загрожувати небезпека ураження електричним струмом або коли надання допомоги на місці не можливе. Для того, щоб не втрачати час, не слід роздягати потерпілого. Не обов'язково, щоб при проведенні штучного дихання потерпілий знаходився в горизонтальному положенні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз методів перевірки стаціонарності вібраційних сигналів показав, що застосування статистичних критеріїв – F-критерію Фішера та t-критерію Стюдента – дозволяє достовірно оцінити сталість основних статистичних параметрів (математичного сподівання та дисперсії) у часі, що є необхідною умовою для подальшого коректного аналізу та підвищення точності діагностики технічного стану об'єкта.

2. У результаті розгляду методів статистичного спектрального аналізу встановлено, що найбільш ефективним для дослідження вібрацій шихтованого магнітопроводу є підхід на основі періодограм, який дозволяє отримати асимптотично незміщені оцінки спектральної густини та знизити дисперсію шляхом усереднення або розбиття реалізації на відрізки, що забезпечує підвищення точності та зручність реалізації на ЕОМ.

3. Розроблено макет комп'ютерної системи діагностики силових трансформаторів, який забезпечує збудження, реєстрацію, аналогову та цифрову обробку вібраційних сигналів магнітопроводу при ударному збудженні, а також реалізує алгоритми статистичного спектрального аналізу для визначення технічного стану пресування магнітопроводу.

4. Проведено експериментальні дослідження на макеті магнітопроводу, виготовленого з магнітострикційної сталі, які підтвердили можливість використання ударного методу для діагностики стану пресування. Встановлено, що у випадку зжатого магнітопроводу основна частота вібрацій близько 600 Гц, тоді як при ослабленні пресування з'являється значна кількість додаткових частотних складових у діапазоні до 25 кГц.

5. Визначено основні діагностичні ознаки стану пресування магнітопроводу: амплітуди, частоти та кількість максимумів спектрограм у фіксованій смузі частот. Саме ці параметри є найбільш інформативними при оцінюванні технічного стану пресування.

6. Побудовано методику формування методичних сукупностей у діагностичному просторі за спектральними параметрами, що дозволяє здійснювати навчання системи та подальше автоматичне розпізнавання станів магнітопроводу.

7. Розроблено та реалізовано двохальтернативне рішення для визначення стану пресування магнітопроводу на основі критеріїв Неймана-Пірсона, що забезпечує мінімізацію імовірностей помилок першого та другого роду.

8. Приведені експерименти підтвердили ефективність застосування розробленого макету та методики спектрального аналізу для діагностики стану магнітопроводу силових трансформаторів. Отримані результати доводять можливість практичного використання запропонованого способу ударної діагностики у системах технічного обслуговування трансформаторного обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Купчик, В. О., Сердюк, Т. Т., Головачук, Г. І., Волосинецький, Р. Б., Мовчан, Л. Т., & Сисак, І. М. (2022). Підвищення надійності та пропускну здатності трансформаторних підстанцій. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 80-81.
2. Сисак, І. М., & Скакун, О. І. (2016). Дослідження та вибір заходів підвищення надійності системи електропостачання трансформаторної підстанції 35/10 кВ. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 192-192.
3. Бабанін, Н. В., Сисак, І. М., Гапонюк, А. В., & Максимчук, О. М. (2017). Вибір трансформаторів підстанцій за навантажувальною здатністю. *Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 3, 89-89.
4. Буняк, О. А., & Борисюк, Я. В. (2018). Розробка заходів зниження втрат електроенергії трансформаторної підстанції. *Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 3, 6-6.
5. Ребрина, В. В., Стасів, А. З., & Сисак, І. М. (2025). Система діагностики сухих силових трансформаторів на вібрацію. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“*, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 57-57.
6. БУНЯК, О., СТАСІВ, А., ОРОБЧУК, Б., & СУДОМИР, В. (2025). РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОРІВНЯЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ

З ВРАХУВАННЯМ УМОВИ ЕКОНОМІЧНОСТІ. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 357(5.2), 115-122. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-73>

7. Боденчук, С. А., Блаженко, В. М., & Бабюк, С. М. (2025). Цифровізація підстанцій, як революційна трансформація енергетичного сектору. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “*, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 16-17.

8. Бабюк, С. М., & Хлопик, В. В. (2019). Актуальність задачі відновлення електропостачання знеструмлених споживачів трансформаторних підстанцій. *Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “*, 3, 7-7.

9. Мокін, Б. І. Математичні методи ідентифікації динамічних систем : навчальний посібник / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 260 с.

10. Новицький І.В. Випадкові процеси. [Текст]: навч. посіб. / І.В. Новицький, С.А. Ус; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 2-ге вид. випр. і доп. – Д. : НГУ, 2014. – 132 с.

11. Статична радіотехніка. Конспект лекцій. Кузик А.О. Л.: НУ «Львівська політехніка» – 2017. – 125 с.

12. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник / О. І. Огірко, Н. В. Галайко. – Львів: ЛьвДУВС, 2017. – 292 с.

13. Руденко В. М. Математична статистика. Навч. посіб. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 304 с.

14. С.Д. Гапochenko, Т.М. Шелест, С.С. Кривоніс. Основи спектрального аналізу : навч.-метод. посіб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2024. – 68 с.

15. Фельдман Л.П., Петренко А.І., Чисельні методи в інформатиці, – Київ: Видавнича група BHV, 2006. – 480 с.
16. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання. Навч. посіб. / В. А. Матвійчук, О. Є.Рубаненко, І.О. Гунько – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 138 с.
17. Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко Я. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,06 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.
18. Діагностування та технічний сервіс електрообладнання навчальний посібник: / А. П. Войцицький, І. В. Нездвєцька, Ю. Л. Новосилецький, В. В. Мельничук.– Житомир : ПП Рута. 196 с. 2024.
19. ШПАЧУК, О. (2024). ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ЧАСТОТНОГО ВІДГУКУ. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 339(4), 115-121. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-18>
20. Слідєнко М. О., Тептя В. В. Діагностика силових трансформаторів. *LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки* : Зб. матеріалів, м. Вінниця, 24 берез. 2025 р. Вінниця, 2025.
21. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
22. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

23. Гурик О.Я. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці [електронний ресурс]: //Інституційний репозитарій Atutor (код дисципліни ІД 4656): офіційний сайт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя – Тернопіль, 2017. – Режим доступу: <https://dl.tntu.edu.ua/index.php>.