МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Марченко Д.М., Смирний М.Ф., Бойко Г.О., Жидков А.Б.

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДДЕФЕКТНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Монографія

Сєвєродонецьк 2016

УДК 620.179.1:519.2 М 30

> Рекомендовано Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

> > Рецензенти:

Ткаченко В.П., доктор технічних наук, професор кафедри тягового рухомого складу залізниць ДЕТУТ *Шведчікова І.О.*, доктор технічних наук, професор кафедри електричної інженерії СНУ ім. В.Даля

Марченко Д.М.

М 30 Визначення переддефектного стану металоконструкцій об'єктів підвищеної небезпеки: монографія / Д.М. Марченко, М.Ф. Смирний, Г.О. Бойко, А.Б. Жидков. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2016. – 268 с.

ISBN 978-617-11-0084-8

В монографії проаналізовано причини виходу з ладу металоконструкцій об'єктів підвищеної небезпеки, викладено основні закономірності деградації матеріалу металоконструкцій, розглянуто сучасні магнітометрічні прилади для неруйнівного контролю металоконструкцій та описано прилад нового покоління для визначення переддефектного стану металоконструкцій об'єктів підвищеної небезпеки.

Монографія може бути корисною широкому колу науковців та фахівців, які працюють з металоконструкціями і діяльність яких пов'язана з визначенням їх переддефектного стану та прийняттям рішення про продовження, або припинення експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки.

УДК 620.179.1:519.2

ISBN 978-617-11-0084-8

- © Марченко Д.М., Смирний М.Ф., Бойко Г.О., Жидков А.Б.
- © Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2016

вступ

В монографії розглянуто причини руйнування металоконструкцій об'єктів машинобудування підвищеної небезпеки (ОМПН), динаміку розвитку руйнування, підходи до визначення переддефектного стану металоконструкцій і обладнання для його діагностики.

В першому розділі встановлено, що основними причинами виходу з ладу ОМПН є накопичення втомлених мікропошкоджень, які виникають в металі внаслідок змінного навантаження, впливу корозійного середовища, теплозмін та інших зовнішніх факторів, або їх поєднаної дії. На першому етапі розвитку втомні пошкодження зазвичай не мають зовнішніх проявів у вигляді макроскопічних деформацій, тріщин і т.п. Але зміни внутрішніх властивостей матеріалу в наслідок його пластичної деформації при накопиченні втомних мікропошкоджень відбиваються на електричних, магнітних властивостях, спектру коливань, твердості, та інших фізичних параметрах матеріалу та ОМПН в цілому.

В другому розділі розглянуто завдання про накопичення пошкоджень на моделях регулярних фракталів. Цей підхід дозволяє детальніше досліджувати з отриманням кількісних характеристик тимчасову еволюцію процесу пошкоджуваності. Встановлений зв'язок кінетики механізму напрацювання на відмову з принципами нерівноважної термодинаміки. На основі статистично-термодинамічного опису еволюції системи розвинені визначальні співвідношення, що додають інформаційну значущість взаємозв'язку акустичних послідовностей і структурного чинника як передвісника колапсу системи. Визначальні співвідношення, записані у вигляді еволюційних рівнянь, забезпечують конкуренцію позитивних і негативних зворотних зв'язків між параметрами навантажуваного середовища, для якого враховані ефекти накопичення і дисипації енергії в системі.

В третьому розділі розглянуто зміни магнітних полів поблизу дефектів та ділянок із високим ступенем пластичної деформації. Встановлено, що магнітне поле в ділянках з дефектами, або у різних стадіях проходження пластичної деформації може бути визначено різними магнітометричними методами. Всі магнітометричні методи мають певні обмеження і сферу застосування. Дефекти структури і пластично здеформовані ділянки мають яскраво виражений просторовий розподіл магнітних властивостей, геометрічні характеристики яких корелюють з геометричними характеристиками цих ділянок і дефектів. Тому для визначення переддефектного стану доцільним є вимірювання магнітного поля у декількох напрямках.

Індуктивних датчикі більш доцільно для магнітних полів, що швидко змінюються у часі, або для швидкісного обстеження рухомих об'єктів з постійним магнітним полем. Для вивчення статичного магнітного поля, яке має неоднорідності, більш доцільним є використання магніторезистивних датчиків.

В четвертому розділі описано прилад для визначення дефектів та переддефектного стану металу на підставі сканування магнітного поля на поверхні конструкції. Наведено результати випробування приладу на зразках, які довели здатність приладу ідентифікувати дефекти типу пора, тріщина, непровари у зварних швах, а також ділянки із металом, що був значно пластично деформований і досяг межі пластичності, що дозволяє визначати зону у переддефектному стані. Розглянуто питання впливу візуалізації результатів вимірювання магнітного поля на надійність ідентифікації різних типів дефектів

Розділ 1

ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ ОМПН ТА ІСНУЮЧИ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДДЕФЕКТНОГО СТАНУ

У даному розділі представлені дослідження, які дозволяють систематизувати основні причини виходу з ладу ОМПН та існуючи методи і підходи для визначення настання переддефектного стану ОМПН

1.1. Основні причини виходу з ладу ОМПН

Якщо виключити з розгляду виходи з ладу машин і конструкцій внаслідок різких нерозрахованих перевантажень, природних впливів, які не піддаються контролю, грубих помилок при проектуванні або експлуатації чи несприятливого поєднання перерахованих факторів, то інші випадки настання граничних станів можна віднести переважно до однієї з двох великих груп [1].

Першу групу утворюють граничні стани, які настали в результаті поступового накопичення в матеріалі розсіяних пошкоджень, що призводять до зародження і розвитку макроскопічних тріщин. Часто зародки і вогнища таких тріщин, викликані недосконалістю технологічних процесів, містяться в об'єкті до початку його функціонування. Причиною виходу об'єкта з ладу є розвиток тріщин до небезпечних або небажаних розмірів. Якщо тріщина не виявлена вчасно, її розвиток може привести до аварійної ситуації. Друга група складається з граничних станів, пов'язаних з надмірним зносом деталей і поверхонь які піддаються тертю (абразивне) і є у контакті з робочим або навколишнім середовищем (корозійне чи ерозійне зношування). Другий випадок зазвичай супроводжується наочними проявами зношування і його діагностика не так утруднена, як першого. Розглянемо більш детально першу групу граничних станів.

Розглядаючи статистику відмов можна відзначити, що найбільша їх кількість виникає від зварювальних дефектів і тріщин малоциклової втоми, які розвиваються в зоні максимальних напружень. При цьому зони зварного шва і термічного впливу є найбільш ймовірними місцями руйнування будь яких конструкцій, які отримуюсь з використанням зварювання плавленням за рахунок існування в цих районах невиявлених технологічних дефектів. Практично всі спостерігалися випадки руйнування обладнання носили характер втомних тріщин, які розвивалися від зони максимальних напружень або від місць розташування дефектів у вузлах сполучення конструкцій.

Таким чином, характерними місцями руйнувань є технологічні отвори, накладні і монтажні з'єднання [1, 27].

Класичний приклад напружених об'єктів - посудини, що працюють під тиском. Ці об'єкти зустрічаються майже у всіх областях техніки, зокрема, в енергетиці, на транспорті, в хімічній і нафтогазовій промисловості. Посудини тиску зазвичай розраховують на великі терміни служби. Стінки посудин працюють в умовах розтягуючих напружень, часто при підвищених температурах, нерідко в контакті з активними та агресивними середовищами. Для безпеки роботи необхідні досить великі запаси міцності. Однак товщина стінок посудин повинна бути обмеженою з технологічних, економічних та інших міркувань. Іноді маса посудин тиску обмежена умовами технічної здійсненності проекту в цілому.

Руйнування або пошкодження як результат розвитку тріщин - типова форма граничного стану посудин тиску. Для ілюстрації використовуємо дані, отримані при аналізі відмов посудин тиску, проведеному за дорученням Управління по атомної енергетиці Великобританії [2]. Були досліджені парові котли, теплообмінники, резервуари хімічної та нафтохімічної промисловості і т. д. Аналіз був призначений для оцінки допустимого ризику стосовно до оболонок атомних реакторів, тому він включав дані, що відносяться до порівняно товстостінних (товщиною більше 9,5 мм) і напружених (з робочим надлишковим тиском більше 725 кПа) оболонок. Серед розглянутих 229 відмов було 13 відмов катастрофічного характеру. В інших випадках експлуатація була припинена, оскільки виявлені ушкодження були класифіковані як небезпечні.

Далі наведена статистика відмов (табл. 1.1).

Переважна більшість (94%) відмов пов'язано з виникненням тріщин. Звичайне місце знаходження тріщин - зварні шви або їх околиці. У таблиці 1.2 наведені причини, які були признані такими, що призвели до розвитку тріщин [3].

Відносно невелику частку втомних тріщин (24 %) можна пояснити тим, що амплітуди напруг і (або) числа циклів в посудинах тиску зазвичай не бувають занадто великими. Звертає на себе увагу високий відсоток уроджених тріщин, мабуть, технологічного походження (29 %). Цей висновок узгоджується з наступним спостереженням: близько 64 % загального числа відмов парових котлів доводиться на відмови котлів з терміном служби до 10 років (для аналізу було взято дані по котлам, прослужили до 40 років).

Таблиця 1.1

Причина відмов	Число відмов	%
Розвиток тріщин	215	94
Дефекти виготовлення	5	2
Корозія	1	
Помилки при експлуатації	3	4
Повзучість	3	4
Не встановлений	2	
Разом	229	100

Статистика відмов посудин тиску

Таблиця 1.2

Причини розвитку тріщин

Причина відмов	Число відмов	%
Втома	52	24
Корозія	30	14
Технологічні тріщини	61	29
Не визначена	62	28
Різні (повзучість, помилки при експлуатації і т. д.)	10	5
Всього	215	100

Особливо велика роль втомних пошкоджень і розвитку тріщин для деталей і вузлів, що зазнають вібраційних навантажень. Прикладом служать авіаційні двигуни, що працюють в умовах високих температур, під дією швидкісних потоків, змінних і вібраційних навантажень [4]. Хоча в авіаційних двигунах крім механічних процесів важливу роль відіграють процеси перетворення енергії, а також процеси управління, близько 60 % відмов у двигунах мають механічне походження. Серед останніх, близько 80 % відмов пов'язано з накопиченням втомних пошкоджень, розвитком втомних тріщин і спорідненими явищами. Аналогічну картину спостерігаємо в конструкціях всередині-корпусних пристроїв атомних реакторів і теплообмінників. Основні причини відмов трубних пучків (крім абразивного зношування та фреттинг-корозії) - втомне руйнування через вібрації і змінних теплових навантажень в потоці газу або теплоносія [5].

Зміна властивостей металу в зварному шві або навколошовній зоні істотно впливає на процеси руйнування. Відзначено, що найбільш часто зустрічаються випадки освіти вогнищ відмов обладнання при розвитку втомної тріщини по крихкому механізму. При дослідженні крихкого руйнування розглядається напружений стан в вершині тріщини з використанням силових, енергетичних і деформаційних критеріїв руйнування [9, 16 - 18]. Отримані результати досліджень крихкого руйнування знайшли своє відображення в серії методичних рекомендацій і нормативних документах з проектування посудин що працюють під тиском [18, 19]. При аналізі напружень і деформацій в потенційно небезпечних зонах руйнування виникають складнощі через відсутність аналітичного рішення крайових задач в теорії пластичності. Розвиток обчислювальної техніки і методів кінцевих елементів сприяє збільшенню можливостей аналізу пружних деформацій в зонах концентрації напружень. Однак використання даного підходу вимагає значних витрат часу для вирішення поставлених рівнянь і істотно залежить від вихідної інформації. Крім цього, результати вирішення коректно застосовувати лише до даної конструкції [16, 17, 21].

Ще одним типовим прикладом відповідальних металоконструкції, є різні типи підйомно-транспортного устаткування, наприклад, кранів.

Досвід експлуатації підйомно-транспортного устаткування показує, що до моменту закінчення нормативного терміну служби у 80 % кранів залишковий ресурс ОМПН не вичерпаний [6-8]. Дану обставину може бути пояснено не тільки значним розкидом їх довговічності в залежності від умов експлуатації і властивостей матеріалу конструкцій, а й заниженими розрахунковими значень нормативного терміну служби, якщо сприймати останнє як міру ресурсу. Отже, нормативний термін служби не є граничним значенням працездатності вантажопідіймальних кранів [8-10]. Тому, для забезпечення максимально тривалої, надійної та безаварійної роботи кранів з вичерпаним нормативним терміном служби, потрібно рішення задачі - оцінки залишкового ресурсу ОМПН [6,8-10].

1.1.1. Оцінка рівня напруженості ОМПН на прикладі кранів мостового типу

На рис. 1.1 представлена схема мостових двохбалкових кранів, яка використовується при розрахунку їх ОМПН.

При розрахунках на вертикальні навантаження головні балки розглядаються як шарнірно-оперті на кінцях (див. рис. 1.2). Величина розподілених навантажень q визначається за даними обмірів, а зосереджених навантажень: Gк (вага кабіни), Gэл (вага зосередженого електроустаткування) і Gм = 2G'м (вага механізму пересування крану) береться з технічних паспортів кранів або довідкової літератури. На рис. 1.2 представлені епюри вигинаючих моментів в головних несучих балках, викликані дією вертикальних навантажень (побудовані окремо від постійних зосереджених, постійних розподілених навантажень і навантажень, що переміщуються).



Рис. 1.1. Схема металоконструкції мостового двохбалкового крану

Максимальні значення вигинаючих моментів від навантажень, що переміщуються визначені за формулою:

$$M_{max}^{D} = \frac{2 \cdot D}{L} \cdot \left[\frac{L}{2} - \frac{a}{4}\right]^{2}, \qquad (1.1)$$

де D - тиск на ходове колесо вантажного візка;

а - база вантажного візка;

L - проліт крану (див. рис. 1.2).



Рис. 1.2. Епюри вигинаючих моментів в головній балці мостового крану при дії вертикальних навантажень

При розрахунках на горизонтальні навантаження міст крану розглядається як плоска рама (див. рис. 1.3) з урахуванням наступних допущень: візок встановлено посередині прольоту крану, тиск коліс візка приймається однаковим, інерційні сили від маси моста і механізму пересування прийняті рівномірно розподіленими, а обидві головні балки прийнято рівно навантаженими. Величина горизонтальних інерційних сил приймається рівною 10 % від відповідних вертикальних навантажень, тобто $q\Gamma = 0,1 \cdot (q + \Sigma Gi / L), P\Gamma = 0,1 \cdot D.$



Рис. 1.3. Епюри вигинаючих моментів в металоконструкціях моста крану від дії горизонтальних навантажень

Вигинаючий момент в середньому перерізі головних балок M1 = X1 при дії горизонтальних навантажень визначається з рівняння

$$X_I \cdot \delta_{II} + \Delta_{IP} = 0 \tag{1.2}$$

Для визначення переміщень $\delta 11$ і $\Delta 1p$ побудовані епюри вигинаючих моментів від зосереджених навантажень Pr, рівномірно розподілених навантажень qr і від X1 = 1 (див. рис. 1.3, а-в). Вигинаючий момент в середньому перерізі головних балок M1 = X1 визначається як:

$$X_{I} = \frac{6 \cdot b \cdot m_{p} + 2 \cdot L \cdot m_{q} + \left[16 \cdot c^{2} \cdot \ell_{I} + 2 \cdot (1 - 2c)^{2} \cdot \kappa\right] \cdot \varphi \cdot (m_{p} + m_{q})}{6 \cdot L + \left[16 \cdot c^{2} \cdot \ell_{I} + 2 \cdot (1 - 2c)^{2} \cdot \kappa\right] \cdot \varphi},$$
(1.3)

де $m_p = P^r \cdot b;$ $m_q = q^r \cdot L^2/8;$ $c = I_1/B;$ b = (L-a)/2; $\ell 1 = (B-\kappa)/2 - довжи$ на консолей кінцевих балок; Б - база крану; к - колія вантажноговізка; φ = Jrбу/ Jкбу - відношення моменту інерції головної балки Jrбу відносно вертикальної вісі у - у до моменту інерції кінцевої балки Jкбу відносно її вертикальної вісі.

Максимальні значення вигинаючих моментів рівні:

по середині головних балок М1 = Х1;

на кінцях головних балок M2 = X1 - (mp + mq);

на кінцевих балках $M3 = M2 \cdot (1-2c); M4 = M2 \cdot 2c.$

Епюра сумарних вигинаючих моментів, діючих на міст крану в горизонтальній площині, приведена на рис. 1.3, г.

Нормальні напруження в найбільш навантажених волокнах нижнього поясу головних балок:

$$\sigma_{H}^{max} = \frac{\Psi_{q} \cdot (M^{q} + M^{p}) + \Psi_{Q} \cdot M_{max}^{D}}{W_{H}} + \frac{M_{I}}{W_{y}} \leq [\sigma]_{II}$$
(1.4)

де М^q, М^p - вигинаючі моменти в розрахунковому перерізі головної балки від дії вертикальних постійних навантажень;

M^D_{max} - найбільший вигинаючий момент від тиску ходових коліс;

M1 - вигинаючий момент в середньому перерізі головної балки від дії горизонтальних інерційних навантажень;

WH і Wy - моменти опору перерізу головної балки відносно вісей х-х і у-у відповідно.

В табл. 1.3 наведено результати розрахунку нормальних напружень в нижніх волокнах найбільш навантаженого перерізу головних балок мостових кранів, викликаних дією, відповідно, постійних навантажень (зосереджених Рі і розподілених qi) і навантажень D ,які переміщуються. Розрахунки виконано для кранів мостового типу підприємств Луганської області при їх експертному обстеженні, виконаному фахівцями експертно-діагностичної науково-дослідної лабораторії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Сумарні напруження розтягування в найбільш навантажених волокнах нижнього поясу головних балок розглянутих кранів складають $\sigma_{\rm H}^{\rm max} = 69,2\div135,6$ МПа (графа 8 таблиці 1.3) і отримані вони з урахуванням динамічних навантажень, що виникають при роботі механізмів підйому вантажу і пересування кранів (див. формулу 1.4).

Таблиця 1.3

Розрахункові напруження в небезпечному перерізі головних балок мостових кранів

				Напруження в середньому перерізі		ому перерізі	
N₂	В/п, т	Проліт,	, Рік головних балок, МП		МПа		
3/п	(ПВ %)	Μ	виготовл.	-q+p	σ^{D}	σr	c max
				0	O_{max}	O_{l}	O_H
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5 (25)	16,5	1963	47,2	37,1	5,7	103,1
2	5 (25)	16,5	1963	48,0	37,4	6,5	104,1
3	5 (25)	16,5	1962	29,3	34,1	5,7	78,8
4	5 (25)	20,0	1972	39,4	33,0	4,7	87,7
5	5 (25)	16,5	1974	31,8	39,5	5,7	88,0
6	5 (25)	16,5	1978	64,1	37,5	5,9	121,4
7	5 (25)	16,5	1963	46,3	37,7	6,1	102,3
8	5 (25)	17,0	1964	48,9	38,9	6,5	106,9
9	5 (25)	20,0	1957	37,6	36,6	6,8	92,2
10	5 (25)	17,0	1958	46,4	35,6	6,5	100,5
11	5 (25)	22,5	1965	59,4	40,5	8,0	121,9
12	5 (25)	17,0	1958	50,3	41,1	6,8	111,4
13	5 (25)	17,0	1959	44,0	36,0	6,2	97,6
14	5 (40)	16,5	1971	31,4	43,7	6,3	97,8
15	5 (40)	16,5	1962	27,6	36,7	6,0	84,2
16	5 (40)	20,0	1979	31,8	26,3	5,7	74,8
17	5 (40)	20,0	1980	30,9	26,8	6,0	74,8
18	5/5 (40)	20,0	1957	46,7	31,3	5,6	97,7
19	5/5 (40)	22,5	1966	31,3	22,5	5,6	69,2
20	5/5 (40)	22,5	1966	37,0	23,4	5,2	76,3
21	5/5 (40)	22,5	1966	34,8	23,4	5,1	73,4
22	5/5 (40)	22,5	1966	33,8	22,8	5,0	71,8
23	5 (40)	17,0	1970	34,7	51,5	7,2	112,4
24	10 (25)	22,5	1964	25,6	47,3	6,6	91,5
25	10 (25)	22,5	1965	25,1	47,9	6,6	91,6
26	10 (25)	22,5	1977	32,0	48,1	7,3	100,2
27	10 (25)	28,5	1984	31,1	60,1	8,7	118,1
28	10 (25)	20,0	1953	31,2	48,5	4,9	97,5
29	10 (25)	22,5	1970	27,5	45,2	5,3	89,8
30	10 (25)	22,5	1972	29,9	49,8	5,9	98,6
31	10 (15)	22,5	1967	26,8	39,9	5,0	75,0
32	10 (25)	22,5	1973	27,6	39,5	5,1	82,8
33	15/3 (25)	20,0	1957	22,1	59,5	6,9	102,6
34	15/3 (25)	20,0	1965	19,1	56,5	7,3	96,1
35	15/3 (25)	20,0	1965	21,9	56,3	6,6	98,3

1	2	3	4	5	6	7	8
36	15/3 (25)	16,5	1966	18,6	61,4	7,6	101,7
37	20/5 (40)	19,5	1963	18,9	57,8	7,3	103,2
38	20/5 (25)	22,5	1963	24,0	60,1	8,3	106,7
39	30/5 (25)	22,5	1966	24,5	77,5	9,7	129,7
40	30/5 (25)	22,5	1967	25,0	75,8	9,6	128,0
41	30/5 (25)	20,0	1969	18,5	74,4	8,4	118,0
42	30/5 (25)	22,0	1969	22,8	83,8	10,0	135,6
43	50/10 (25)	19,5	1964	17,4	83,3	9,4	128,5
44	50/10 (25)	22,0	1970	18,6	80,6	11,0	128,1

Продовження табл. 1.3

Враховуючи відносно невелику величину сумарних напружень (див. табл. 1.3, графа 8) і що вони мають місце нечасто (напруження $\sigma_{\rm H}^{\rm max}$ виникає при розтаціуванні візка з номінальним вантажем в сере-

^{ОН} виникає при розташуванні візка з номінальним вантажем в середині прольоту), можна стверджувати, що втомні руйнування в найбільш навантаженому перерізі головних балок (в середині прольоту) маловірогідні. Це підтверджує і практика експертного обстеження великої кількості мостових кранів різної вантажопідйомності і прольотів.

У табл. 1.4 наведені результати розрахунків напруженодеформованого стану ОМПН кранів магнітно-грейферних, які працюють у важкому та надважкому режимах експлуатації (група A6, A7) на одному із підприємств Луганської області. Розрахунки показують, що сумарні напруження в найбільш навантажених волокнах нижніх поясів головних балок кранів значно (більш ніж в 2 рази) менші напружень, які допускаються для сталей, з яких виготовлено металоконструкції балок кранів.

Таблиця 1.4

N⁰	В/п, т	Продіт м	Рік	Напруження МПа		Матеріал головних балок
3/п (ПВ %) проли	riposiri, si	виготовл.	σ_{H}^{max}	[σ]		
1	10 (40)	28,0	1976	103,9	250	09Г2-12
2	10 (40)	28,0	1977	103,6	250	09Г2-12
3	10 (40)	28,0	1977	103,6	250	09Г2-12
4	10 (40)	28,0	1977	102,1	250	09Г2-12
5	10 (40)	28,0	1977	103,9	250	09Г2-12

Розрахункові напруження в небезпечному перерізі головних балок мостових магнітно-грейферних кранів

В той же час саме металоконструкції, зведених в табл. 1.4 мостових кранів мають найбільше число дефектів (див. фото на рис. 1.4 - 1.12). Це свідчить про те, що причиною їх виникнення є не вертикальні, а горизонтальні навантаження.

1.1.2. Характерні дефекти металевих конструкцій кранів мостового типу

Багаторічний досвід експертного обстеження вантажопідіймальних кранів свідчить, що найчастіше дефекти у вигляді втомних тріщин виникають у таких місцях ОМПН як: буксові вузли кінцевих балок; вузли з'єднання головних балок з кінцевими балками; місця кріплення (зварювання) кронштейнів робочих майданчиків з вертикальними стінками головних балок; верхні пояси головних балок в місцях зварного з'єднання з планками кріплення рейок вантажного візка. На рис. 1.4-1.12 представлені найпоширеніші з них.



Рис. 1.4. Буксовий вузол кінцевої балки крану



Рис. 1.5. Корозійне руйнування вертикальної стінки кінцевої балки



Рис. 1.6. Тріщина у вертикальній стінці у місці зварювання з кронштейном кріплення майданчика механізму пересування



Рис. 1.7. Тріщина в вертикальній стінці буксового вузла кінцевої балки



Рис. 1.8. Тріщина в вертикальній стінці біля її зварювання з верхнім поясом кінцевої балки



Рис. 1.9. Тріщина в криволінійній частині буксового вузла



Рис. 1.10. Тріщина в місці зварювання ребра жорсткості з поясом



Рис. 1.11. Тріщина в місці зварювання окантовочного кільця з нижнім поясом кінцевої балки



Рис. 1.12. Тріщина в зоні зварювання кронштейна кріплення механізму пересування

Виникнення великого числа тріщин в кінцевих балках пояснюється як їх конструктивними недоліками, так і великими горизонтальними зусиллями на них у вузлах кріплення букс. Горизонтальні зусилля реалізуються в буксових частинах кінцевих балок у вигляді крутного моменту рівного множенню сили на радіус колеса та сили, зумовленої перекосом. Сила перекосу, а відповідно, і крутний момент при переміщенні кранів змінюються, тому вплив поперечних сил призводить до появи у вузлі знакозмінних напружень, частота яких залежить від числа включень механізму пересування крану [32].

Враховуючи те, що величина горизонтальних інерційних навантажень при розрахунках ОМПН кранів приймається рівною 10 % від вертикальних навантажень, що явно не відповідає реально діючим навантаженням при експлуатації кранів, а навантаження, що діють у поперечній площині до напрямку руху крану взагалі не враховуються при розрахунках, так як існуючі методики [19] їх розрахунку дають велику розбіжність отриманих результатів, оцінити рівень навантажень на металоконструкції можна лише експериментальним шляхом із застосуванням спеціальних приладів.

1.2. Теоретичні уявлення про настання переддефектного стану

При експлуатації ОМПН в ряді випадків виникнення та розкриття тріщин спостерігається і на віддалі від конструктивних і технологічних концентраторів напружень, що також призводить до аварійної ситуації [29]. Основною причиною руйнування в таких випадках вважається накопичення втомних пошкоджень.

У роботі [25] розглянута фізична сутність втомного пошкодження металу і запропонована модель розвитку цього процесу.

Основні висновки з запропонованої моделі полягають в наступному:

- розвиток процесу втомного руйнування супроводжується зміною локальної щільності металу, що реалізується через появу областей зі зниженою і підвищеною щільністю;
- метал руйнується в зоні концентрації напруг через зменшення своєї щільності або розпушення;
- процес руйнування починається в підповерхневому шарі і розвивається вглиб металу;

 накопичення втомних пошкоджень і розвиток процесу руйнування - це збільшення частки розпушеного шару металу на поверхні виробу і в його обсязі.

Встановлено, що втомне руйнування металу має три фази:

- перша підготовча, яка полягає в перерозподілі поздовжніх неоднорідностей деформації, які вишиковуються в існуючих умовах в «зручну» для металу періодичну послідовність; процес у цій фазі розвивається у двох напрямках - в глибину і довжину, характеризується порівняно високою швидкістю, і триває порівняно недовго - 1,0 - 1,5 % від граничної кількості циклів;
- друга основна накопичувальна, що характеризується дуже повільним плином процесу розвитку в одному напрямку в глибину (від одиниць до десятків мікрон) і триваюча дуже довго 90 95 % від граничної кількості циклів;
- третя фінальна, що протікає дуже швидко і яка веде до виникнення в «випадковому місці» мікротріщини і розвитку її з дуже високою швидкістю в глибину і довжину і перетворенню її в макротріщину.

Слід зазначити, що перші дві фази розвитку втомних пошкоджень металу в умовах циклічного навантаження добре вивчені, а ось третя фаза, що стала предметом численних досліджень, залишається значною мірою таємницею.

На рис. 1.13 наведено графічне представлення трьох фаз процесу накопичення втомних пошкоджень металу у вигляді залежності товщини ослабленого (пухкого) шару металу δ 10-6 від кількості циклів навантаження N.

У роботі [25] цей графік представлений кількісно на основі розрахункового дослідження для трубного зразка в умовах симетричного циклічного навантаження вздовж радіуса.

Швидкоплинність третьої фази і невизначеність місця початку руйнування досі не дозволяли детально вивчати події, що передують руйнуванню безпосередньо на обладнанні.

Тим не менш, було достовірно встановлено, що основною характеристикою стану металу, що визначає його живучість при циклічному навантаженні, є швидкість розвитку тріщини, яка нерівномірно збільшується по мірі накопичення втомних пошкоджень спочатку дуже повільно, а потім раптово, починаючи з якогось значення, названого критичної швидкістю, різко і швидко. Так з'явилася умовна характеристика, названа трещиностійкостью.



Рис. 1.13. Динаміка накопичення втомлених пошкоджень (a) на початковому етапі, (б) на кінцевому етапі

У роботі [26] зазначається, що критична швидкість росту тріщини - це швидкість збільшення товщини «пухкого» шару або зміни щільності поверхневого шару металу в зоні концентрації напружень. Отже, можна говорити про критичну товщину цього шару металу, вище якої починається незворотний процес утворення тріщини.

Отже основним завданням при оцінці залишкового ресурсу є визначення часу переходу процесу руйнування між стадіями та зони, де починається накопичення втомних пошкоджень. Актуальним є виявлення діагностичних ознак, що дозволяють визначати потенційно небезпечні зони руйнування в конструкційному матеріалі.

1.3. Закономірності зміни фізико-механічних характеристик матеріалу в процесі малоциклового навантаження

Дослідження причин і механізмів відмов конструкцій ОМПН показує, що, як правила, їх руйнування починаються з поверхневого шару. які розвиваються з плином часу [16, 17]. При експлуатації обладнання в умовах циклічного силового впливу змінюються структура матеріалу, механічні характеристики. При навантаженні відбувається накопичення пошкоджень, критична величина яких відповідає досягненню конструкційним матеріалом граничного стану. Основним напрямком в області вивчення закономірностей руйнування при циклічному навантаженні є використання уявлень про пошкоджуваності матеріалу і встановлення критеріальних залежностей (рівнянь) [42 - 44]. У роботах Баришова С.Н., Шахматова М.В., Горицького В.М. і ін. [45, 46, 64 - 66] зазначено, що процес накопичення пошкоджень супроводжується необоротним зміною структури через зсувних процесів всередині зерен і механічним зміною обсягу поверхневого шару внаслідок силового впливу на матеріал. В процесі навантаження спостерігається зміна механізму адаптації конструкційний матеріал, пов'язана з малоциклова характером навантаження. При цьому в системі спостерігаються екстремальні зміни механічних і фізичних характеристик, які є діагностичними ознаками стадій процесу руйнування. Здатність конструкційних матеріалів чинити опір упругопластичні деформації визначається його структурним станом [51, 55].

Руйнуванню передує пластична деформація металу, при якій основну роль відіграють дислокації. Під час пластичної деформації в ділянках металу значно зростає їх кількість і вони починають інтенсивний рух вздовж ліній ковзання відповідно до прикладених навантажень.

При цьому русі дислокації стикаються з різного роду бар'єрами. І при циклічному навантаженні дислокаційна структура приймає стійкий вигляд, у наслідок упорядкування «загальмованих» дислокацій. Одним з найбільш розповсюдженим бар'єром для дислокації є інша дислокація того ж знаку.

На підставі описаних вище підходів в роботі [67] був розроблений комплекс програм, що базується на рівнянні руху. ЕОМ-експерименти проводилися за наступним алгоритмом:

1. Проводиться розстановка дислокацій на модельної майданчику за законом випадкових чисел.

1. Перевіряється, чи не виявилися дислокації різного знаку занадто близько один до одного. Ця перевірка необхідна, щоб виключити можливість їх анігіляції, вводиться додаткова умова, згідно з яким дислокації різного знаку не можуть перебувати один від одного на відстані менше 2 мкм (параметр анігіляції).

3. Проводиться перегрупування дислокацій ансамблю з урахуванням параметра анігіляції. Отримане розподіл приймається за вихідне.

Підкреслимо, що рух дислокації відбувається під дією знакозмінного навантаження, зумовленої наявністю зовнішніх коливань, в постійному в часі, але не однорідному по простору, пружному полі взаємодії дислокацій. В результаті цього рух дислокації може описуватися суперпозицією поступального і коливального руху.

4. Використовуючи систему рівнянь руху дислокацій ансамблю, знаходимо зсув кожної дислокації ансамблю за час Δt і визначаємо їх до ординати в момент часу $t = t_0 + \Delta t$. Повторюємо цю процедуру з кроком за часом рівним Δt до тих пір, поки не припиниться поступальний рух дислокацій і буде досягнуто стаціонарний стан ансамблю дислокацій або рухається у змінному полі напружень, або в результаті релаксації у відсутності змінного навантаження.



Рис. 1.14. Начальне розташування дислокацій ансамбля, сформованого з рівної кількості «позитивних» та «негативних» дислокацій [42]

Приклади, отриманих результатів з використанням програмного комплексу, наведено на рис. 1.15 - 1.17. Розташування дислокацій в початковому стані зображено на рис. 1.15.



Рис. 1.15. Розташування дислокацій після релаксації напружень внаслідок змінного навантаження [42]

Розподіл дислокацій в кінцевому стані ансамблю дислокацій, отримане в результаті впливу коливань, зображено на рис. 1.16.

Розподіл дислокацій, отриманий в результаті природної релаксації ансамблю після початкової розстановки при відсутності зовнішнього впливу, можна бачити на рис. 1.17.

З порівняння рис. 1.14 - 1.16 видно, що дислокації, спочатку розташовано за випадковим законом, після впливу коливань, їх розташування не є однорідним і утворюють систему диполів, дислокаційних комплексів і дислокаційних стінок.



Рис. 1.16. Кінцеве розташування дислокацій після релаксації напружень без впливу зовнішнього навантаження [42]

З наведених результатів можна зробити висновок, що під впливом коливань відбувається процес полігонізації (самоорганізації дислокацій ансамбля).

Загалом при пластичної деформації під впливом коливань відбувається перебудова дислокаційної структури, з утворенням стійких форм, які можуть бути визначено і які сприяють розмірної стабільності виробу.

Загалом можна зробити припущення, що чим більш орієнтована дислокаційна структура, тим більше дислокацій та дислокаційних скупчень знаходяться в стійкому положенні.

Для цього випадку треба прикласти набагато значніші зусилля для деформації металу з впорядкованою дислокаційною структурою. Тому в кінцевому етапі, коли можливості пластичної деформації практично вичерпано ми будемо мати впорядковану дислокаційну структуру із значною кількістю дислокацій, що згруповано біля бар'єрів.

Згідно [45] дислокаційні структури поділяються на кілька типів.

Для мартенситу ці структури у порядку виникнення по мірі зростання ступеня деформації ескізно наведено у табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Тип структури	Ескіз
Нефрагментовані рейки з	
сітчастою субструктурою	
Утворення первинних фраг- ментів з сітчастою субстру- ктурою	W W W
Перетворення фрагментів з сітчастою субструктурою у фрагменти з осередковою структурою	(A) # K) (水) # (水) # (水) #
Утворення вторинних без- дислокаційних фрагментів	
Повністю фрагментовані мартенситні рейки	C C C C C C C C C C C C C C C C C C C

Основні типи впорядкованих дислокаційних структур на прикладі мартенситу

Тобто в результаті перебудови дислокаційної структури відбувається подрібнення зеренних складових, що підвищує структурну і розмірну стабільність внаслідок зростання супротиву деформації.

Приклади сформованих структур різного типу для сталей мартенситного та феріто-перлітного класу наведено на рис. 1.17 – 1.19.



Рис. 1.17. Приклади низькоенергетичних дислокаційних структур: а – хаотичний розподіл; б – дислокаційні скупчення; в,д – сітчаста структура; г – нерозорієнтовані осоредки, е – клубкова структура [45]



Рис. 1.18. Дислокаційні вени [45]



Рис. 1.19. Приклади раз орієнтованих дислокаційних структур: 1 – осередкова; осередкова-сітчаста; 3 – полосова; фрагментована [45]

Існують два шляхи перетворення дислокаційних структур. Вони відрізняються рівнем енергії, що притаманний кожному. (рис. 1.20).



Рис. 1.20. Послідовність появи різних типів структур

Для різних типів кристалічної решітки межа ступеня деформації, при який відбувається певна перебудова є різною. Найбільш суттєву роль відіграє щільність дислокацій. Але послідовність і загальна залежність типу структур від ступеня пластичної деформації та кількості дислокацій зберігається в усіх матеріалах.

Можна зробити висновок, що структура металу у переддефектному стані в ділянках з інтенсивною пластичною деформацією (небезпечних зонах) значно відрізняється від структури «нормального металу». Цілком природньо очікувати також значної зміни магнітних властивостей цих ділянок, що підтверджується багатьма дослідженнями.

1.4. Способи визначення небезпечних зон

Для цього використовуються різні способи. Розглянемо деякі з них.

Дані зони визначаються за допомогою приладів і установок, які дозволяють виявляти порушення цілісності, геометричні характеристики структурних одиниць технологічного обладнання, зміни фізичних, механічних і хімічних характеристик матеріалу в процесі експлуатації [46].У великому різноманітті методів і засобів неруйнівного контролю для виявлення розвинених дефектів, що характеризуються глибиною залягання і геометричними розмірами, і зон концентрації напружень виділяють оптичні, капілярні методи, радіохвильовий і радіаційний контроль, ультразвукову дефектоскопію, теплової контроль і т.д. [46 - 48]. Потенційну зону руйнування на етапі формування дефекту можна визначити за результатами аналізу зміни рівня напруженого стану в локальних зонах. Серед методів оцінки напруженого стану виділяють [27]:

- розрахункові методи, засновані на теорії пружно деформування металу, на моделюванні і методі кінцевих елементів;

- експериментальні методи, сутність яких полягає в поділі конструкції на елементи із застосуванням механічних приладів, електричних тензометрів, твердометрія;

- експериментальні руйнівні методи, засновані на зміні деформації кристалічної решітки від дії силових факторів.

Виявлення осередків зародження дефектів, які в процесі втомного навантаження стають зонами потенційного руйнування конструкційного матеріалу, можна здійснити за допомогою аналізу зміни фізичних і механічних характеристик металу при силовому впливі.

В якості параметрів, що дозволяють оцінити зміни фізикомеханічних властивостей металу, використовуються коерцитивної сила, напруженість постійного магнітного поля, електричний опір, параметри відгуку електричного сигналу, результати твердометрія і т.д. [15, 20, 27, 36, 63, 66]. В роботі [54] встановлено, що потенційну зону руйнування можна визначити за максимальним значенням вектора напруженості постійного магнітного поля при різному рівні накопичених пошкоджень у матеріалі. Також потенційну зону руйнування можливо визначити за результатами векторного аналізу напруженості постійного магнітного поля. Аналіз структурних змін проводиться на основі фракталографіческіх досліджень, виходячи з чого визначаються мультифрактального параметри.

Застосування мультифрактального параметрів структури дозволяє встановити механізм накопичення пошкоджень в металі шляхом побудови фрактальних карт адаптивності [20]. Відносна напруженість постійного магнітного поля при статичному і циклічному деформуванні зразків плоского типу в зоні подальшого руйнування має максимальне значення (рис. 1.22).

Дана особливість дозволяє визначати потенційні зони руйнування металу при експлуатації. Векторне подання напруженості постійного магнітного поля дозволяє визначити потенційну зону руйнування. Так в роботі [20] зазначено, що в оболонкової конструкції, що має проточку по котра утворює циліндричної обичайки і знаходиться під внутрішнім тиском, вектора напруженості постійного магнітного поля спрямовані в зону подальшого руйнування.

У роботах А.А. Дубова, В.Т. Власова [33, 57] розглядається втомлена пошкодженість конструкційного матеріалу і описана послідовність накопичення пошкодженості, яка дозволяє виявляти зони руйнування і здійснювати кількісну оцінку стану матеріалу за допомогою методу магнітної пам'яті металу та інших методів.

У наукових роботах Наумкіна Е.А., Баширова М.Г., Кузеева І.Р. і ін. [11, 15, 20, 51 - 55] для визначення терміну безпечної експлуатації нафтогазового обладнання застосовувалися електромагнітні та акустичні методи контролю. На підприємствах нафтогазової галузі, де використовується великогабаритне обладнання, перспективним є стосовно вуглецевих і низьколегованих сталей використання магнітних і вихорострумових методів контролю, які засновані на взаємодії електромагнітного поля з об'єктом дослідження [11].



Рис 1.21. Зміна відносної напруженості постійного магнітного моля по поверхні плаского зразка в умовах втомного навантаження (а) та при статичному навантаженні (б) [20]

До електромагнітного контролю відноситься клас методів неруйнівного контролю, в яких використовують електромагнітну енергію частотою нижче, ніж частота видимого світла [50]. В роботах [41, 73] показано, що якщо в якості інформаційного параметра взяти таку магнітну характеристику, як коерцитивної сила металу, то її приріст складе величину 200 ... 300% (для конструкційних сталей широкого застосування), поки втомні явища розвиваються від стану поставки (новий метал) до стану передруйнування під дією прикладених навантажень. Метод характеризується простотою і дешевизною як самого процесу вимірювань, так і приладом для їх реалізації, так як час одиничного виміру приставним датчиком приладу має порядок кілька секунд, при цьому не потрібна особлива підготовка поверхні контрольованого металу, допускається її суттєва шорсткість і кривизна, немає залежності контролю від температури навколишнього середовища. Отримана оцінка стану металу є інтегральною в товщині (глибині) шару від декількох міліметрів до декількох сантиметрів в залежності від типу використовуваного приставного датчика [44, 49, 61, 63, 69, 71, 74].

Відомі і широко застосовуються для оцінки накопичення втомних пошкоджень різні лічильники аналогового типу. Основу лічильників аналогового типу складають чутливі елементи - датчики, встановлені на об'єкті і що піддаються тим же впливам, що і досліджуваний об'єкт. Внаслідок незворотних ушкоджень, що виникають в датчику, його параметри поступово змінюються. Вимірюючи ці параметри, можна зробити деякі висновки про ступінь пошкодження відповідного вузла або деталі. В якості чутливих елементів використовують дротяні, фольгові або напівпровідникові тензорезистори. Поряд з цим використовують датчикисмужки з металу або полімеру з ініційованою початковою тріщиною (надрізом). Мірою пошкодження служить глибина тріщини, вимірювана, наприклад, за кількістю тонких дротів, розміщених поперек надрізу. В основу датчиків аналогового типу може бути покладений вельми широке коло механічних, фізико-механічних і хіміко-механічних явищ, супроводжуючих процес накопичення ушкоджень.

Проте здійснення реальних вимірювань за допомогою цих лічильників дуже клопітка справа. Хоча між ушкодженням датчика і пошкодженням конструкції існує позитивна кореляція, безпосередній перерахунок пошкоджень не завжди можливий. Для перерахунку щоразу необхідно вирішувати задачі про накопичення пошкоджень в датчику і елементі конструкції, встановлювати кількісний зв'язок між рішеннями цих задач і потім оцінювати залишковий ресурс. Додаткові труднощі виникають в умовах випадкового, багатокомпонентного і нестаціонарного навантаження, а також за наявності значного розкиду властивостей датчиків і конструкції. Тому реалізація даного методу дає наближену оцінку у залишкового ресурсу ОМПН.

Почтєнний Е.К. у своїй роботі [27] розглядає питання теоретичного обгрунтування методів прогнозування довговічності деталей машин за результатами іспитів з втомленості. Основою для розробки методів є кінетична теорія механічної втоми. Додаток теорії дано на прикладах прогнозування довговічності деталей транспортних машин, станин пресів, посудин тиску та інших вузлів і деталей. Окремо розглядаються питання діагностування втоми деталей машин і прогнозування залишкового ресурсу довговічності в умовах експлуатації.

Для визначення залишкового ресурсу він пропонує використовувати індикатори втоми, які поділяються на дві групи:

1. Індикатори, фізичні параметри яких змінюються з ростом ступеня втомного пошкодження контрольованої деталі;

1. Індикатори, накопичують втомні пошкодження разом з контрольованою деталлю.

До першого типу належить датчик, виготовлений з графіту з поліфенілквіноксіліновой ізоляцією. У небезпечній локальній зоні деталі він кріпиться за допомогою ціанілідного клею, із зростанням ступеня пошкодження змінюється електричний опір датчика. При попередньому випробуванні деталі з графітним датчиком з'являється можливість встановити залежність ступеня пошкодження деталі від опору датчика.

В експлуатації реєстрація опору графітового датчика дозволяє оцінити ступінь пошкодження контрольованої деталі і прогнозувати залишкову довговічність. Однак використанню графітового датчика повинна передувати таріровка, що вимагає отримання при випробуваннях контрастної фрактографічної картини втоми металу або додаткового застосування засобів неруйнівного контролю. Недоліком даного методу є також те, що для реєстрації опору потрібно додаткове обладнання безпосередньо на робочому місці. Датчик неможливо встановити на зварні з'єднання.

Другий тип датчиків - індикатори, які накопичують пошкодження разом з контрольованою деталлю. Одним з прикладів таких індикаторів є індикатори втоми, розроблені в Ризькому інституті інженерів цивільної авіації, для діагностики втоми крила літака АН - 24. Індикатори з листового дюралюміну Д 16 АТ товщиною 0,5 мм, шириною 9 і довжиною 90 мм. У середній частині пластини є двосторонні надрізи глибиною 1,5 мм з кутом розкриття надрізу 60° і радіусом дна 0,5 мм. На крилі літака вибирається 2 - 3 перерізу, в кожному з яких кріпиться в напрямку головних напружень 10 - 12 індикаторів. Кріплення проводиться клеєм холодного затвердіння ЕДП, пластифікованого тіоколом і наповненого цементом.

Вважається, що закономірності процесу втоми в індикаторі та конструкції збігаються, оскільки вони виготовлені з одного і того ж матеріалу, характеризуються рівними ефективними коефіцієнтами концентрації напруг і на них впливають однакові рівні напруги в будь-який момент навантажування. Виходячи з цього, робиться висновок про відповідність кривих втоми індикаторів і конструкції [27].

Діагностування втоми і прогнозування залишкового ресурсу крила проводиться за залишковим ресурсу індикаторів, що накопичують втомні пошкодження разом з контрольованою деталлю.

Запропоновано два варіанти прогнозів з використанням кривих втоми, попередньо отриманих в лабораторних умовах.

За першим варіантом індикатори проходять попередні напрацювання у в лабораторних умовах до часткового вичерпання ресурсу, кріпляться до крив у і при експлуатації доводяться до руйнування.

За другим варіантом індикатори без попередньої напрацювання кріпляться до крила і після заданого періоду спільної роботи знімаються і випробовуються до руйнування в лабораторних умовах.

Залишковий ресурс індикаторів з урахуванням знайденого співвідношення лабораторних та експлуатаційних умов є залишковою довговічністю крила.

Недоліком даного методу є те, що має значне розсіювання ресурсів як крил, так і індикаторів. Використання даного типу індикаторів для залишкового ресурсу можливо тільки на конструкціях, виконаних з того ж матеріалу, що і індикатор. Дані індикатори не дають можливості діагностування в експлуатації випадкового пошкодження кожного крила.

Застосування даного методу на реальних зварних конструкціях важко, так як він вимагає отримання кривих втоми не реальної конструкції, а спочатку моделі конструкції при різних режимах навантаження, що практично вимагає великих часових і матеріальних витрат, а головне, не гарантує високу точність оцінки залишкового ресурсу.

Для прогнозування ресурсу зварних конструкцій може також застосовуватися метод металевих плівок [34-36], заснований на використанні мідних, алюмінієвих плівкових датчиків, що володіють незворотнім накопичувальним ефектом зміни властивостей у процесі циклічного навантаження.

Суть методу полягає в реєстрації за допомогою металевої плівки як датчика, результатів дії на поверхні металів мікрозсувів, що призводять до накопичення втомних пошкоджень [37, 38]. Плівка та досліджуваний метал знаходяться у щільному контакті і працюють при циклічних навантаженнях одночасно. Метал сприймає тимчасове навантаження, а плівка - навантаження від металу через мікрозсуви, викликані дислокаційними процесами і розривом міжатомних зв'язків. Мікрозсуви призводять до первинних оборотним і подальшим незворотнім мікродеформації як в металі, так і в плівці. Подальший розвиток в них необоротних мікродеформацій та пов'язані з нею зміни в стані їх структури і поверхні характеризують процес накопичення втомних пошкоджень. Мікрозсуви, а, отже, і мікродеформації, орієнтовані в напрямку поверхні. Тому на ній пошкоджуваність виявляється, спочатку у вигляді окремих ліній ковзання. Надалі відбувається безперервний процес виникнення і зростання ліній ковзання. У зв'язку з тим, що матеріал плівки більш пластичний, ніж метал, незворотні мікродеформації, а, отже, і процеси накопичення втомних пошкоджень і зміни в ній відбуваються значно раніше. Таким чином, плівка відображає накопичення втомних пошкоджень і зміни в ній відбуваються значно раніше. Плівка відображає накопичення втомних пошкоджень у металах навіть при їх роботі в пружною області.

Основними перевагами методу є:

Простота реалізації. З металевої плівки товщиною 10 мкм. нарізають датчики необхідних форм і розмірів, які потім наклеюють на досліджувані місця. Через можливе зниження чутливості датчика товщина клейового прошарку не повинна перевищувати 1 мкм. Датчик не вимагає орієнтування на поверхні деталі, так як його властивості у всіх напрямках практично однакові. На відміну від тензорезисторних датчиків він не вимагає також температурної компенсації.

Зручність. Метод можна застосовувати безпосередньо на працюючому обладнанні. Він не потребує будь-яких спеціальних умов у порушенні експлуатаційного режиму навантаження. Для знімання інформації з датчиків використовують перерви в роботі устаткування. Інформацію знімають безконтактним методом - візуально за допомогою збільшувального скла, портативного мікроскопа з виходом зображення на комп'ютер або спецприладом з автоматичним записом або поетапної реєстрацією корисного сигналу. Інформацію датчика можна фотографувати і документувати.

Достовірність. Датчики реагують на циклічну зсувну мікродеформацію основного металу, величина якої знаходиться в прямій залежності від рівня діючих напружень і ступеня втоми металу. Тривалість циклічного впливу при цьому призводить до поступового появі та розвитку на поверхні датчика ліній ковзання, стан яких спостерігається у вигляді локальних темних ліній і ділянок. Таким чином, можна бачити пошкодженість поверхні металу. Закономірності накопичення втомних пошкоджень в металі та зміни стану поверхні датчика збігаються. Тому датчик відображає фактичне накопичення втомних пошкоджень в металі.

Надійність. Датчики мають властивість «пам'яті», що забезпечує можливість на будь-яких етапах циклічного навантаження реєструвати і кількісно оцінювати пошкодженість основного металу незалежно від того, чи є на поверхні датчика реакція чи ні. Прирощення реакції датчика завжди йде від досягнутого раніше рівня, що підтверджується пода-
льший приріст пошкодженості металу. У знятого з досліджуваного міста датчика отримана від металу інформація не зникає. Надалі вона може зберігатися без зміни необмежений час (роками). Нею можна користуватися в будь-які періоди часу.

Ефективність. Метод практично безбазовий. Він дозволяє знімати корисну інформацію з датчика на базі 3-4 мкм. Від вигину датчика його властивості не змінюються. Ці обставини сприяють надійному виявленню втомного пошкодження в локальних зонах. Навіть е концентраторах напружень на кордоні сплавки зварного з'єднання і на самому зварному шві. Датчики можна багаторазово встановлювати і знімати з об'єкта, що дає можливість визначати пошкоджуваність конструкції на різних етапах її навантаження. Метод прийнятний для встановлення пошкоджуваності металу, як до, так і після виникнення всіляких дефектів, включаючи втомні тріщини. За швидкістю його накопичення можна визначати ступінь небезпеки виявлених дефектів. За допомогою спеціально розроблених методик метод дозволяє отримувати кількісні характеристики накопиченого втомного пошкодження, циклічної навантажене і ресурсу зварних конструкцій в умовах їх експлуатації.

Зокрема, в роботі Троценко Д.А. [39] розглядається спосіб прогнозування ресурсу зварної металоконструкції розвантажувальної стріли роторного екскаватора ЕРП-1250 за допомогою мідних гальванічних плівок при впливі експлуатаційних навантажень. При цьому плівки у вигляді датчиків розміром 4 х 40 мм наклеювалися безпосередньо на зварні з'єднання. Вони охоплювали всі характерні зони.

У процесі циклічного навантаження конструкції реєструвалася ступінь потемніння поверхні датчика, що характеризує накопичення втомних пошкоджень залежно від тривалості циклічного впливу. За отриманим результатами дослідження встановлювалася залежність ступеня потемніння датчика від числа циклів навантаження. Напрацювання конструкції при цьому складала близько 20-30% від довговічності. На зразках визначалося граничне значення накопиченого втомного пошкодження, відповідне виникненню макротріщини. Надалі прогнозувався залишковий ресурс шляхом екстраполяції раніше встановлених залежностей для кожного датчика до граничного значення накопиченого втомного пошкодження.

Основним недоліком методу прогнозування ресурсу зварних ОМПН є те, що він не дозволяє прогнозувати залишковий ресурс зварних ОМПН, що були в експлуатації, тому що він вимагає реєстрації накопиченого втомного пошкодження від вихідного стану.

Крім цього він не дозволяє реєструвати накопичення втомного пошкодження металоконструкції у важкодоступних місцях через великі

габаритів приладу. Тому для встановлення закономірних втомних пошкоджень мостових кранів в місцях, відповідальних за втомні руйнування, не представляється можливим.

Досить перспективним є метод оцінки залишкового ресурсу ОМПН мостових кранів, запропонований в роботі Сизранцева В.Н. [40, 41]. Він полягає у використанні кривих втоми матеріалу ОМПН крана, тарувальних залежностей датчиків з змінної і постійної чутливістю до амплітуді деформацій і математичної моделі прогнозування залишкового ресурсу. За даною методикою прогнозування залишкового ресурсу ОМПН здійснювалося за основним металу.

Стосовно до зварних з'єднань конструкцій, а саме там вона частіше і руйнується, він пропонує використовувати ефективні коефіцієнти концентрації напружень.

Однак, у свою чергу, значення ефективних коефіцієнтів концентрації напружень визначаються на основі результатів випробування зварних і не зварних зразків. Їх значення не відповідають реальним конструкціям.

Тому їх застосування на конструкції дає наближену оцінку залишкового ресурсу.

Крім цього при отриманні кривих втоми використовувався жорсткий режим навантаження зразків, яка не відповідає режиму навантажування реальної конструкції, що також може дати похибку при оцінці залишкового ресурсу.

У роботах А.І. Гедровича [42, 43] для дослідження пластичної деформації металу при зварюванні також використовувався подібний спосіб. Однак сліду деформації у вигляді слідів пачок смуг текучості в місці виходу їх на поверхню отримували з використанням окисних плівок.

Даний метод гарантує спільну роботу металу і «індикатора» т.к. плівки отримують безпосередньо на зварному з'єднанні. Можливо також виявлення слідів пластичної деформації на полірованій поверхні [43]. Однак, як і розглянутий раніше, даний метод не позбавлений недоліків. Основний з них - трудомісткість отримання «індикаторних поверхонь» і необхідність їх надійного захисту від пошкоджень і корозії протягом усього терміну експлуатації конструкцій.

Ще одним загальним недоліком останніх методів, є їх локальність. Тобто необхідно заздалегідь знати місця найбільш ймовірного накопичення пошкоджень. Крім того вихід смуг текучості для конкретних умов навантаження можливий на внутрішні чи важкодоступні поверхні, наприклад внутрішні поверхні закритих профілів.

Інформацію про наявність тріщини отримують за допомогою спектрального аналізу вібросигнал [56], що пояснюється його простотою і універсальністю. В основі спектрального аналізу лежить первинне Фур'є-перетворення вхідного сигналу, суть якого полягає в тому, що майже будь-яку періодичну функцію (у нашому випадку - безперервний коливальний процес складної форми) можна представити сумою окремих гармонійних складових (синусоїд і косінусоід з різними амплітудами, періодами і, отже, частотами). Іншими словами перетворенням Фур'є називається процес виокремлення з складного сигналу простих взаємопов'язаних гармонійних синусоїдальних коливань.

Відповідно до міжнародних стандартів і нормативно-технічних рекомендацій, в якості нормованих параметрів в більшості випадків застосовують середньоквадратичне значення (СКЗ) віброшвидкості.

Діагностування великої частини дефектів і несправностей здійснюється порівнянням отриманих в результаті дослідження спектрів СКЗ віброшвидкості зі спектрами, характерними справного стану (еталонний спектр). Висновок про наявність і розвитку будь-якого дефекту проводиться на підставі аналізу зміни амплітуди власної або інший вибраної частоти і кратних їй гармонік. Тому з метою визначення впливу розміру та місця розташування тріщиноподібні дефекту на характер зміни даних характеристик в роботі [57] були проведені заміри СКЗ віброшвидкості в низькочастотному діапазоні коливань від 0 до 500 Гц з числом ліній в спектрі 3200.

В якості основи для розробленої методики використовувалися результати досліджень спектрів вібрації вала ротора з тріщиною [57]. Спектри СКЗ віброшвидкості представлені на рис. 1.22 і 1.23.

Аналізуючи отримані результати, було визначено, що при збільшенні глибини тріщиноподібного дефекту спостерігається плавне зростання амплітуди гармоніки оборотної частоти обертання валу і більш інтенсивний ріст другої гармоніки. Зростання амплітуди першої гармоніки спостерігається в межах глибини тріщини від 0 до 10% від поперечного перерізу валу, далі величина амплітуди практично залишається постійною. Причиною цього є те, що вібрація на зворотній частоті в основному залежить від початкової неврівноваженості ротора через дефекти виготовлення і монтажу, а незначне збільшення амплітуди відбувається через додатковий прогин в сторону тріщиноподібного дефекту.

Більш інтенсивний ріст амплітуди другої гармоніки є наслідок асиметрії жорсткості системи в результаті впливу ефекту «схлопування» тріщиноподібного дефекту. Процес обертання ротора з поперечною тріщиною на валу супроводжується появою періодично мінливого сигналу з частотою 2ω жорсткістю системи.Величини амплітуд СКЗ віброшвидкості другої гармоніки оборотної частоти валу для систем з різною глибинної тріщиноподібного дефекту представлені в табл. 1.6.



Рису. 1.22. Віброшвидкості при поперечному розрізі в перетині А: а – горизонтальний напрямок, б – вертикальний напрямок



Рис. 1.23. Віброшвидкості при поперечному розрізі в перетині Б: а – горизонтальний напрямок, б – вертикальний напрямок [24]

Таблиця 1.6

Глибина	СКЗ віброшвидкості, мм / с			
тріщини	Перетин А		Перетин Б	
щодо попе-				
речного пе-	Горизонтальний	Вертикальний	Горизонтальний	Вертикальний
рерізу ва-	напрям	напрям	напрям	напрям
лу,%				
0	0,5	0,8	0,5	0,8
3	0,8	1,8	0,8	1,1
10	2,3	3,0	1,1	1,5
20	3,4	3,8	1,3	2Д
30	3,9	4,8	1,5	2,7
40	4,5	5,3	2,0	4,1

Значення СКЗ віброшвидкості другої гармоніки оборотної частоти валу від глибини тріщиноподібного дефекту

Крім інтенсивного впливу на першу і другу гармоніки, зростання глибини тріщиноподібного дефекту призводить до появи додаткових компонент вібраційного сигналу на інших гармониках оборотної частоти, збільшення рівня вібрації яких незначно в порівнянні з першою і другою. По спектру СКЗ віброшвидкості при розташуванні дефекту в перетині A (рис. 6.10, а) видно, що в горизонтальному напрямку спостерігається зростання загального рівня вібрації з третьої по шосту гармоніку, у вертикальному напрямку (рис. 6.10, б) - зростання третьої і четвертої гармонік. Схожа картина має місце і при тріщиноподібному дефекті в перетині Б (рис. 1.24).



Рис. 1.24. Розташування перерізів А та Б [57]

Аналіз отриманих даних підтверджує необхідність та доцільність використання засобів вібродіагностики, заснованих на спектральному аналізі СКЗ віброшвидкості, для виявлення та контролю тріщино подібних дефектів, які зароджуються і розвиваються. Однак за результатами такого роду вимірювань зробити висновок про наявність чи відсутність дефекту можна з певною мірою вірогідності.

Високе значення другої гармоніки частоти обертання ротора може вказувати на такі несправності насоса як неврівноваженість ротора, неспіввісність з'єднання приводу і редуктора, або ж на неравножесткость ротора.

Для зварної конструкції це може бути биття на опорі, стуки нещільно закріплених деталей і пр. шуми. Це необхідно враховувати при проведенні досліджень.

Крім того, ускладнено визначення місцезнаходження дефекту. Основною відмінністю спектрів СКЗ віброшвидкості (рис. 1.22.і 1.23) є лише те, що тріщиноподібного дефект в перетині А викликає великі амплітуди вібрації в порівнянні з дефектом в перетині Б.

Тому для більш точної, однозначної ідентифікації дефекту типу поперечної тріщини (ПТ) необхідно визначення додаткових діагностичних ознак. Допомогти вирішенню даної проблеми може більш докладне вивчення модальних параметрів системи, так як одним з характерних ознак стану конструктивного елемента є його власна частота і форма коливань.

Відомо, що поява будь-якого дефекту, порушення цілісності конструкції призводить до зміни її власних частот і форм коливань. Дане явище має місце і проявляється більш інтенсивно на тих власних частотах, кривизна форми мод яких має найбільші деформації і переміщення в місці локації дефекту. Роторна система з поперечною тріщиною не є винятком. Все зазначене вище, справедливо і для зварних конструкцій. Отже, використовуючи дану властивість, за допомогою моніторингу АЧХ системи в області власних частот з'являється можливість визначення місця розташування втомних тріщин.

З метою визначення частотних діапазонів прояви тріщиноподібного дефекту і зіставлення з результатами, отриманими при модальному аналізі роторної системи, у роботі [58] було проведено вимірювання вібрації в широко-частотному діапазоні від нуля до 3000 Гц. В якості інформативної характеристики було обрано СКЗ віброприскорення, так як ця величина більш чутлива до складових сигналу в середньо і високочастотної області. Результати замірів вібрації наведено на рис. 1.25, 1.26.

Аналізуючи результати проведеного спектрального аналізу СКЗ віброприскорення видно, що тріщиноподібний дефект викликає зростання амплітуд спектра в трьох частотних діапазонах: від 320 до 400 Гц (рис. 1.25), від 780 до 920 Гц і від 1900 до 2450 Гц (рис. 1.26). Судячи з проведеного модальному аналізу, дані діапазони відповідають області третин, четвертою та восьмою модам коливань (табл. 1.6).



Рис. 1.25. Спектр СКЗ при тріщиноподібного дефекті в перетині А: а – в горизонтальному напрямку; б – у вертикальному напрямку [24]

З ростом глибини тріщиноподібного дефекту спостерігається зсув діапазонів підвищеної вібрації в області власних частот у бік зменшення, що пояснюється зміною самих власних частот через вплив дефекту на жорсткість системи. При дефекті в перетині А в вертикальному напрямку зміщення діапазону підвищеної вібрації відбувається з 400 Гц (бездефектне стан) до 320 Гц (глибина надрізу 40% від поперечного перерізу валу), аналогічно для горизонтального - з 400 до 340 Гц (рис 1.25).

Подібна картина спостерігається при розташуванні тріщиноподібного дефекту в перетині Б (рис. 1.26). Тільки в цьому випадку зсув діапазонів підвишенной вібрації спектра СКЗ віброприскорення відбувається в діапазонах від 920 до 780 Гц і від 2450 до 1900 Гц. Як було сказано раніше, ці діапазони відповідають областям власних частот роторної системи (третин, четвертої, восьмої), визначених модальним аналізом.

Отже, можна зробити висновок, що результати модального аналізу корелюють з результатами вібродіагностичних досліджень, заснованих на спектральному аналізі СКЗ виброприскорення. Порівняння результатів модального і спектрального аналізів представлено на рис. 1.27, 1.28. Спостерігається загальний характер зміни значень власних частот досліджуваної системи в залежності від розміру і местоположения тріщиноподібного дефекту.

Таким чином, на підставі комплексного використання аналізу мод коливань роторної системи і спектрального аналізу вібросигналу встановлено:

- при збільшенні розміру тріщиноподібного дефекту відбувається плавне зростання амплітуди гармоніки першого оборотної частоти обертання валу і більш інтенсивний ріст другий. Крім цього спостерігається не настільки значне зростання амплітуд вібрації з третин по шосту гармоніку оборотної частоти обертання вала;

- модальний аналіз коливань роторної системи виявив частотний діапазон прояви тріщиноподібного дефекту в залежності від його місця розташування. Визначено, що дефект в перетині А призводить до зміни власної частоти третин моди коливань, а в перетині Б - четвертою і восьмою. Виявлені моди, характерні їм власні частоти, а також діапазони зміни в залежності від розміру дефекту позначені як інформативні

 результати спектрального аналізу СКЗ віброприскорення корелюють з результатами модального аналізу: спостерігається схожий характер зміни величин власних частот в залежності від розміру та місця розташування тріщиноподібного дефекту;



Рис. 1.26 Спектр СКЗ при тріщиноподібного дефекті в перетині Б: а – в горизонтальному напрямку; б – у вертикальному напрямку [24]



Рис 1.27. Залежність амплітуди спектра СКЗ віброприскорення в діапазоні прояви тріщиноподібного дефекту від його розміру:
◆ Горизонтальне напрямок; ■ Вертикальний напрям а – тріщиноподібного дефект в перетині А, область третин моди; б – тріщіноподібний дефект в перетині Б, область четвертої моди;
в – тріщиноподібнийо дефект в перетині Б, область восьмий моди [24]



Рис. 1.28. Залежність власних частот коливань від глибини тріщини
- Модальний аналіз, вертикальний напрям; - ■ - Модальний аналіз, горизонтальний напрям;
- ▲ - СКЗ віброприскорення, вертикальний напрям;
- х - СКЗ віброприскорення, горизонтальний напрямок;
а – третя мода при дефекті в перетині А;

- б четверта мода при дефекті в перетині Б;
- в восьма мода при дефекті в перетині Б [24]

аналізуючи амплітуди спектрів СКЗ віброприскорення в частотному діапазоні інформативною моди коливань можлива оцінка ступеня розвитку дефекту, а по тому в області власної частоти якої моди відбуваються зміни спектра та робити висновок про його місце розташування [58].

Ці результати дають змогу запропонувати методику визначення ступеня втомного пошкодження зварних з'єднань і на її підставі визначити залишковий ресурс металоконструкції.

Метод магнітної пам'яті металу (ММП) заснований на вимірюванні власного магнітного поля розсіювання, що виникає в областях стійких смуг ковзання дислокацій. Магнітне поле розсіювання формується на доменних межах скупчення дислокацій високої щільності. Власні магнітні поля розсіювання виникають в області дефектів кристалічної решітки (скупчення дислокацій) і неоднорідностей структури виникають зони закріплення доменних кордонів, що викликає зміну знаку нормальної складової вектору магнітних полів розсіювання (ліній Нр = 0). Промисловими дослідженнями встановлено, що отримана природна намагніченість дозволяє визначити структурну спадковість матеріалу обладнання, а лінії Hp = 0 встановлюють зони концентрації залишкових напружень [50, 71]. У дослідженнях Дубова А.А. [62] описано, що металоконструкції при експлуатації піддаються впливу циклічних навантажень і зовнішнього магнітного поля Землі, що сприяє самонамагнічіванію металу обладнання. ММП відноситься до методів ранньої діагностики ОМПН і може застосовуватися як експрес метод при аналізі напружено стану металу. Вихрострумовий метод заснований на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться цим полем в контрольованому об'єкті [42]. У роботах Герасимова В.Г., Федосенко Ю.К., Дорофсева А.Л., Себко В.П. [43, 44, 45, 53] зазначено, що електромагнітні методи характеризуються використанням безконтактної технології, високою продуктивністю, отриманням даних у вигляді електричних сигналів, простотою і надійністю конструкції. На вихідний сигнал істотно впливають зміни хімічного складу і структури об'єкта дослідження, дефекти у вигляді порушення цілісності, дефекти, пов'язані з технологією виготовлення обладнання, і ряду інших факторів [43]. Невелика кількість домішок змінюють електропровідність металу. Вимірюючи електропровідність, вирішується зворотна задача - визначається кількість домішок по електропровідності. Іноді вимір електропровідності дозволяє не застосовувати металографічний аналіз і механічні випробування для визначення якості термообробки і визначення механічних характеристик матеріалу [46]. Електромагнітний метод на основі аналізу електричних і магнітних характеристик дозволяє встановити міцність, ступінь наклепу, твердість металу, залишкові або діючі напруги. Такі параметри як коерцитивної сила, залишкова індукція і магнітна проникність є найбільш структурочутливою до змін в металі [14, 47, 48]. Під структурної чутливістю розуміється залежність властивостей від структури тіла (розмір зерна, наявність дефектів і дислокацій). Взагалі структурна чутливість визначається як залежність властивостей конструкційного матеріалу від дефектів в кристалічній решітці [49 - 52]. Вплив на оболонкову конструкцію зовнішніх навантажень сприяє зміні коерцитивної сили, напруженості постійного магнітного поля, залишкової намагніченості. Тому за допомогою цих параметрів можна контролювати напружено-деформований стан ОМПН. Експериментально встановлені залежності зміни електрофізичних параметрів на відповідних стадіях навантаження металу дозволяють вирішувати таку задачу: за значеннями електрофізичних параметрів встановлювати області підвищеної концентрації напружень, визначати зони схильні до упругопластичної деформації і т.п. [59, 72, 75]

При розгляді початкового (інкубаційного) періоду циклічного навантаження видно, що збільшення щільності дислокації призводить до зміни значень електрофізичних параметрів. Ці параметри змінюються при накопиченні дислокацій і формуванні пористої структури. На стадії циклічної плинності спостерігається лавиноподібне збільшення щільності дислокацій як по межах пористої структури, так і в обсязі самої комірки [52]. У роботах Баширова М.Г., Кулеева В.Г., Гуса Н.О., Чернишова О.В. і ін. [53 - 58] наведені результати досліджень залежності електрофізичних параметрів металів з параметрами гармонійних складових спектру сигналу прохідних і накладних вихорострумових перетворювачів. Існують кореляційні зв'язки між параметрами амплітуди відгуку електричного сигналу перетворювачів і структурними змінами, механічними властивостями металів. Вимірювання параметрів електричного сигналу дозволяють визначати напружений стан обладнання [54]. У роботах Абакумова А.А. [59, 60] зазначено, що зміна параметрів магнітного поля можна фіксувати наступними способами: зміна параметрів електричного кола; зміна електромагнітної індукції; зміна параметрів магнітного кола; поєднання попередніх способів. У роботах [33, 42] для оцінки характеру розподілу механічних напружень по поверхні оболонкових конструкцій пропонується застосування інтроскоп МД-11ПМ, робота якого заснована на вимірі втрат перемагничування в контрольованому виробі. Розроблений інтроскоп дозволяє проводити моніторинг розподілу механічних напружень по поверхні устаткування в процесі їх експлуатації, визначати ступінь виразкової і глибину окремих виразкових уражень [22]. У роботах [15, 33] встановлено, що при циклічному навантаженні тимчасовий опір і межа плинності стали 09Г2С зменшуються. В роботі [18] зазначено, що в сталях 19г і 17Г1С, завдяки тривалій експлуатації, механічні властивості мають тенденцію збільшення. Численні дослідження ударної в'язкості вказують на те, що ударна в'язкість при тривалій експлуатації знижується (до 30%), особливо при мінусовій температурі навколишнього середовища [17, 70]. В роботі [68] встановлено, що процеси деградації структури сприяють неоднакового розподілу значень твердості по поверхні пароперегрівачів. Доведено, що в конструкційному матеріалі зі сталі 12Х1МФ коефіцієнт старіння знижується через накопичення пошкоджень, критичне значення якого стає рівним 0,85. Спостерігається гарна збіжність значень механічних характеристик, отриманих при розрахунку за твердістю і при випробуванні на розтяг.

Відомо також, що значення твердості матеріалу обладнання змінам, механічних властивостей металів. Встановлено залежність крихкого руйнування від тиску випробування трубопроводів, де максимум пояснюється двоїстістю ефектів пластичної деформації. Найменша ударна в'язкість спостерігається в трубах з дефектами, які пройшли попереднє навантаження при рівні виникаючої напруги рівних критичних значень. При наявності в конструкційному матеріалі трубопроводу критичних дефектів небезпека крихкого руйнування істотно зростає [44].

У дослідженнях [12] отримані залежності зміни відносного середньої напруги і ступеня загасання амплітуди відгуку електричного сигналу від рівня накопичених ушкоджень, характер зміни яких дозволяє встановити потенційно небезпечну зону подальшого циклічного руйнування. Найбільша чутливість магнітної проникності і рівня магнітних шумів проявляється до зміни напружень в вуглецевих і низьколегованих сталях. Подібна залежність дозволяє визначити працездатний стан елементів металевих конструкцій при пружних деформаціях і встановити початок пластичної течії при безперервному контролі конструкційний матеріал на основі різкого зниження магнітної анізотропії [22].

У дослідженнях Султанова М.Х. [51] запропонована програма технічного діагностування нафтопродуктопроводів, яка складається з раннього обстеження напружено стану небезпечних зон, що дозволяє отримати комплексний підхід до діагностики, оцінити зміни магнітних і механічних властивостей матеріалу і забезпечити достовірність технічного діагностування. Запропоновано магнітний метод як метод визначення зон вимірювання товщини конструкційного металу обладнання та розрахунковий метод, який дозволяє визначити максимальну глибину корозії металу. Даний підхід сприяє підвищенню точності встановлення рівня небезпеки корозійного впливу і завчасному проведенню ремонтних робіт [34]. Виділяють причини внутрішніх напружень на різних ієрархічних рівнях в теплостійких сталях, які перебувають тривалий час в експлуатації:

- наслідком напруг є щільність дислокацій усередині сітчастої субструктури;

несумісні зміни форм зерен;

- частки карбіду знаходяться на кордоні фрагментів.

Встановлено, що щільність контурів вигину-крутіння кристалічної решітки залежить від концентраторів напружень, значення яких максимальні на поверхні конструкційного матеріалу, при русі в глибину металу знижуються. Виявлений ефект свідчить про формування осередків зародження дефектів подальшого руйнування в поверхневих шарах матеріалу труб при порівняно невеликих напругах розтягнення-стиснення. Зміни в структурі конструкційний матеріал, пов'язані з експлуатацією в умовах повзучості, сприяють виникненню в металі локальних внутрішніх напружень, які зростають в процесі подальшої експлуатації обладнання [52].

У дослідженнях [50] пропонується програма експрес оцінки стану матеріалу технологічного обладнання:

- 100% -ний контроль поверхні конструкційного матеріалу методом магнітної пам'яті металу для визначення зон руйнування;

-в виявлених небезпечних областях руйнування проводиться контроль структурно-механічних властивостей за допомогою портативних приладів;

- обробка результатів вимірювання, визначення механічних характеристик матеріалу;

- рішення про подальшу експлуатацію обладнання, конструкційний матеріал якого був обстежений.

Визначенню періоду досягнення конструкційним матеріалом технологічного устаткування граничного стану присвячені дослідження Махутова Н.А., Гусенкова А.П., Баширова М В. Г., Школяр Л.М., Вильданова Р.Г., Іванової В.С., Зайнуллина Р.С., Кузеева І.Р., Наумкіна Е.А., Пермякова В.Н. і ін. [15, 17, 20, 24, 28, 36, 38, 41, 44, 59, 62, 68].

В роботі встановлено [20], що зміна механізмів адаптації структури матеріалу корелює зі зміною його магнітних і мультифрактального параметрів. Це дозволяє встановити граничний стан металевої конструкції. Експериментальні дані свідчать про те, що при першому навантаженні зразка спостерігається різке зниження розмаху градієнта напруженості постійного магнітного поля, який набуває плавне лінійне зниження при подальшій експлуатації. Для сталі 09Г2С визначено послідовність зміни механізму адаптації структури до силового впливу. Цей підхід дозволяє оцінити граничний стан металу за параметрами адаптивності структури. Даним методом встановлено, що рівень накопичених пошкоджень Ni / Np = 0,77 відповідає граничному стану стали марки 09Г2С [20]. Зміна властивостей в матеріалі обладнання при експлуатації має нелінійний характер. Встановлено, що найбільш небезпечними періодами експлуатації є діапазони, яким відповідають такі рівні накопичених пошкоджень: Ni / Np = $0,3 \div 0,4$ i Ni / Np = $0,7 \div 0,8$ (Ni / Np - відношення кількості циклів навантаження на момент вимірювання до кількості циклів до руйнування).

Найбільш точне встановлення граничного стану металу можливо за допомогою трипараметричного контролю, таких параметрів як напруженість постійного магнітного поля, ступінь загасання і середня напруга амплітуди відгуку електричного сигналу, які дозволяють визначити рівень пошкодженості матеріалу при втомному навантаженні. Також встановлено, що поверхнева енергія збільшується в більшому ступені в зоні подальшого руйнування матеріалу [15].

В якості інформативного параметра оцінки рівня пошкодження можна використовувати коерцитивної силу. Встановлено, що при симетричному згині в області малоциклового навантаження коерцитивної сила у міру накопичення пошкоджень знижується як в основному металі, так і в зварному шві. При цьому найбільш інтенсивне зниження відбувається в інтервалі рівня накопичених пошкоджень Ni / Np = 0,8 ÷ 0,9 (області передруйнування) для області зварного шва [19]. Виявлено закономірності впливу деформування і зміни фізичних і механічних властивостей на опір втоми металу. На основі цього розроблено підхід перевірочного розрахунку на міцність і довговічність конструкційного матеріалу труб. З метою продовження термінів служби нафтопроводів були визначені оптимальні умови управління робочим тиском на виході перекачувальних станцій за несучою здатністю лінійної частини трубопроводу [39]. Чаканова А. Н. [41] розроблено методологію аналізу стану матеріалу в потенційній зоні руйнування, яка складається з: визначення граничного стану в мікрооб'ємах, виходячи з теорії дислокацій і мікромеханіки структури; встановлення фізико-механічних характеристик металу в окремих зонах; визначення ступеня впливу зовнішніх впливів на формування дефектів структури; створення моделей про подання механізмів розсіювання, пов'язаних з рухом дислокацій в околиці дефекту; перевірки модельних уявлень на експерименті; визначення критеріїв досягнення граничного стану. В роботі [51] зазначено застосування фрактальної розмірності для кількісного опису дислокаційних структур, меж зерен, будови поверхонь руйнування і ін. В умовах деформації конструкційний матеріал відбувається самоорганізація динамічної системи, пов'язана з обміном речовиною і енергією системи з навколишнім середовищем, що призводить до акумулювання дефектівкристалічної решітки та розпушення структури. Ступінь розпушення структури характеризується пластичними властивостями металевих матеріалів, і тому фрактальна розмірність пластично деформованого об'єму залежить від ступеня деформації. Ця залежність найлегше встановлюється в точках біфуркації системи, які характеризуються універсальністю [55]. Метод, в основі якого лежить аналіз фрактальної розмірності, називається мультифрактального підходом і являє фрактальную міру як взаємопов'язану фрактальними подмножествами, що змінюються по статечному закону з різними показниками [18]. Застосування мультифрактального підходу до аналізу структури металу без можливостей ЕОМ є досить трудомістким і тривалим процесом. Для цієї мети розроблено професором Встовскім Г.В. програмний продукт MFRDrom, який дозволяє здійснювати перетворення структури в математичну форму даних і вести комп'ютерний аналіз ступеня порушення фрактальної симетрії. Сутність програми полягає в аналізі мультифрактального характеристик структури і поданням її у вигляді сукупності нулів і одиниць. При цьому з заходом зіставляється площа, яку займає тільки білими (або тільки чорними) пікселями [44].

В роботі [20] показана застосовність значень мультифрактального параметрів на фрактальної мапі адаптивності в області упругопластических деформацій, аналіз яких дозволяє визначити граничний стан обладнання. В роботі [11] зазначено, що при малоцикловому одноосьовому навантаженні матеріалу зі сталі 09Г2С залежно середнього і чинного напруг амплітуди відгуку електричного сигналу від накопичених ушкоджень (Ni / Np) мають спадний характер, а при рівні Ni / Np = 0,8 спостерігається екстремум, відповідний граничного стану конструкційний матеріал (рис 1.29).

Існує програма оцінки кількості тепла, що виділився внаслідок пластичної деформації, яка полягає у вирішенні рівнянь теплопровідності з внутрішніми джерелами тепла. Граничний стан визначається змін температури: початок пластичних деформацій - по переломів на температурних кривих, а виникнення тріщини і руйнування зразка інтерпретується імпульсами на графіках зміни температури.

При статичному деформації зразка на стадії передруйнування є теплової імпульс, що інформує про початок формування тріщини. Повторне збільшення температури символізує про розвиток тріщини [31].

Результати проведених досліджень Пермякова В.Н. [57] в лабораторних умовах, а також аналіз стану обладнання з дефектами і пошкодженнями дозволив запропонувати такі типи граничних станів [57]:

- при циклічному і статичному навантаженні в'язке і крихке руйнування;



Рис. 1.29. Залежність чинного (а) і відносного середнього (б) напруження амплітуди відгуку електричного сигналу від рівня накопичених пошкоджень Ni / Np

- циклічне руйнування, що сприяє зниженню довговічності на 2-3 порядки внаслідок пошкодження матеріалу;

- неприпустимі зміни структури металу елементів конструкції від негативного впливу близько знаходиться обладнання внаслідок його виходу в аварійну ситуацію.

Аналіз методів оцінки граничного стану конструкційних матеріалів, які працюють в умовах малоциклового навантаження, свідчить про те, немає універсальних методів і проблема є актуальною.

Висновки до розділу 1

1. Основними причинами виходу з ладу ОМПН є накопичення втомлених мікропошкоджень, які виникають в металі внаслідок змінного навантаження, впливу корозійного середовища, теплозмін та інших зовнішніх факторів, або їх поєднаної дії. Накопичення мікропошкоджень на рівні окремих зерен може тривати довго, а процес об'єднання цих мікропожкоджень і формування мікротріщин з переходом їх крізь границі зерен є вже першою стадію руйнування. Подальші процеси руйнування, як правило розвиваються швидко.

2. Втомні пошкодження зазвичай не мають зовнішніх проявів у вигляді макроскопічних деформацій, тріщин і т.п. Згідно дислокаційної теорії пластичної деформації втомні пошкодження виникають внаслідок вичерпання межі пластичності металу внаслідок утворення великої кількості дислокацій, їх переміщення вздовж ліній ковзання та закріплення на природніх перешкодах.

3. Впродовж накопичення втомних пошкоджень, дислокації та дислокаційні скупчення проходять низку стадій з утворенням стійких структур, які характеризують переддефектний стан ділянки

4. Зміни внутрішніх властивостей матеріалу в наслідок його пластичної деформації при накопиченні втомних мікропошкоджень відбиваються на багатьох властивостях матеріалу та ОМПН вцілому. Це зміна електричних, магнітних властивостей, спектру коливань, твердості, та інших фізичних параметрів, які можуть слугувати для ідентифікації стадії руйнування.

5. Накопичено великий досвід використання власних магнітних полів деталі для виявлення ділянок із зміненими механічними властивостями, в тому числі, тих, що знаходяться у переддефектному стані. Існує багато способів визначення магнітних полів, але всі вони мають різну ступінь достовірності та простоти.

Перелік посилань до розділу 1

- Абакумов, А.А. Магнитная диагностика газонефтепроводов / А.А. Абакумов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 440 с.
- Абакумов, А.А. Магнитная интроскопия / А.А. Абакумов. М.: Энергоатомиздат, 1996. – 272 с.
- А.Б. Жидков, Р.Н. Паненко. Возникновение высокочастотных сигналов при вибрационной обработке // Сбірник стендових доповідей міжнародної конференції «Зварювання та споріднені технології у третє тисячоліття. ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, Київ, 2008 – С. 137 – 138.
- А.Б. Жидков, Р.Н. Паненко. Методика исследования АЧХ в процессе виброобработки // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту ім. В.Даля, - 2008. - № 6 (124)., ч. 2 - С. 39 - 44.
- Барышов, С.Н. Оценка поврежденности, несущей способности и продление ресурса технологического оборудования. Модели, критерии, методы / С.Н. Барышов. – М.: Недра, 2007. – 287 с.
- Баширов, М.Г. Обеспечение безопасности эксплуатации и оценка ресурса оборудования для переработки нефти электромагнитными методами диагностики: автореферат дис. д-ра техн. наук: 05.26.03 / Баширов Мусса Гумерович. –Уфа, 2002. –364 с.
- Безлюдько Г.Я. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженнодеформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужицкий, Б.Е. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1999. - №9. –С. 53-57.
- Безлюдько, Г.Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния ресурса металлоконструкции неразрушающим магнитным (коэрцетиметрическим) методом / Г.Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.- 2003. - №2. – С. 20-26.-
- В. М. Сагалевич, С.А. Мезенцева, Г.Х. Насыров. Исследование снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях балочного типа вибрационной обработкой. // Сварочное производство, 1995, № 7 – С. 15 – 18.
- В. Ф. Терентьев. О пределе выносливости металлических материалов. Металловедение и термическая обработка металлов. N7. 2004. 15–19.
- В.А. Ионов, В.И. Борисов, А.М. Вельбель, В.Г. Смирнов. Влияние виброобработки на вибрационный спектр сварных конструкций. // Тяжелое машиностроение, 1998, № 11-12 – С. 28 – 31.
- В.А. Колот, Л.П. Колот, А.В. колот, Л.Я. Ксенофонтов, Г.П. Бартель. Диагностика деталей и технология автоматического вибрационного их старения. // Тяжелое машиностроение, 2002, № 4 – С. 19 – 21.
- Ветер В.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Козлов Э.В. Фрагментированная субструктура и трещинообразование в низколегированной стали // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1994. - N10. - С.44-48.
- 14. Вильданов, Р.Г. Оценка поврежденности потенциально опасных оболочковых металлоконструкций / Р.Г. Вильданов // Безопасность жизнедеятельности. – 2004. - №8. –С. 20-34.

- 15. Власов, В.Т. Физическая теория процесса деформация-разрушение. Часть 1. Физические критерии предельных состояний металла / В.Т. Власов, А.А. Дубов. –М.: Изд-во ЗАО «ТИССО», 2007. –517 с.
- 16. Власов, В.Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В.Т. Власов, А.А. Дубов. М.: Изд-во ЗАО «Тиссо», 2004. –424 с.
- Гедрович А. И., Жидков А.Б., Хижняк А.В. Оценка изменения циклической долговечности в результате виброобработки сварных строительных конструкций // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2009. № 2 - С. 226 – 231
- Гордиенко, В.Е. Пассивный феррозондовый контроль структуры металла и внутренних напряжений в элементах сварных МК / В.Е. Гордиенко. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 83 с.
- 19. Грузоподъемные краны: В 2-х кн.. Кн.1/ Сокр.перевод с нем. Под ред.. М.П. Александрова. М.: Машиностроение, 1981. -216 с.
- Дорофеев, А.Л. Электромагнитная дефектоскопия / А.Л. Дорофеев, Ю.Г. Казаманов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
- 21. Жидков А. Б., Сысоев В. А. Исследование процессов, происходящих при виброобработке на имитационных моделях. // Збірник тез доповідей "Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития : материалы І международной научно-технической конференции", 6-9 октября 2009 г. / под общ. ред. Н. А. Макаренко. Краматорск : ДГМА. 2009. 86 с. ISBN 978-966-379-358-0
- 22. Жидков А.Б. Интенсификация дислокационного скольжения в сварных конструкциях за счет вибрации. «Проблемы сварки, родственных процессов и технологий» : Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры сварочного производства НУК и 75-летию ИЭС им. Е.О.Патона: Николаев: НУК, 2009 - С. 53
- 23. Жидков А.Б. Механизм дислокационной перестройки при низкочастотной виброобработке сварных конструкций //Тезисы докладов 3 международной научно-методической конференции «Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров». - Мариуполь, ПГТУ, 2011. – С. 75 – 76
- 24. Жидков А.Б. Обобщенная модель изменения напряженно-деформированного состояния изделия при виброобработке // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. № 1(12) – Луганськ; вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – С. 223 – 229.
- 25. Жидков А.Б. Особенности взаимодействия дислокаций с препятствиями при низкочастотной вибрационной обрвботке сварных конструкций. // Матеріали VI всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» 25-27 травня 2011 р. -Київ. - 229 С. - С. 71.
- 26. Жидков А.Б., Сисоєв В.О. Вплив технологічних факторів на процес віброобробки зварних конструкцій з метою підвищення їх ресурсу // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. С. 142 149.

- Зайнуллин, Р.С. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости / Р.С. Зайнуллин. – Уфа: МНТЦ «БЭСТС», 1997. – 426 с.
- Иванов Ю.Ф., Гладышев С.А., Попова Н.А., Козлов Э.В. Взаимодействие углерода с дефектами и процессы карбидообразования в конструкционных сталях // Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства. Тула: ТулПИ, 1986. С. 100-105.
- 29. Иванов, В.Н. Синергетика деформирования и разрушения структурнонеоднородных твердых тел. Математический формализм / В.Н. Иванов // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных материалов и конструкций: сб. науч. трудов. –Свердловск: УрО АН СССР, 1989. –145 с.
- 30. Ирмякова, Н.Р. Определение работоспособного состояния участков стальных трубопроводов по электромагнитным диагностическим признакам: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.19 / Ирмякова Нурия Рашитовна. –Уфа, 2002. – 142 с.
- 31. Касаткин Б. С, Лобанов Л. М., Пивторак В. А. Исследование деформаций изгиба при сварке с применением зеркально-оптического метода //Автоматическая сварка. 1971. № 2. С. 32–37.
- 32. Козлов Э.В., Закиров Д.М., Попова Н.Л. и др. Субструктурно-фазовые превращения при интенсивной пластической деформации малоуглеродистой феррито-перлитной стали // Изв. вузов. Физика. - 1998. - №3. - С.63-71.
- Концевой Е.М. Ремонт крановых металлоконструкций. [Текст] / Е.М. Концевой, Б.М. Розеншейн. М.: Машиностроение, 1979. 206 с.
- Кормильцин, Г.С. Диагностика технологического оборудования / Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев, М.А. Промтов. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. –99 с.
- 35. Коробцов, А.С. Показатели качества неразрушающего контроля / А.С. Коробцов // Контроль. Диагностика. 2006. №1. С. 32-42.
- 36. Кузеев, И.Р. Особенности распределения магнитных свойств в материале оболочковой конструкции на начальном этапе циклического нагружения / И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, А.В. Самигуллин, М.З. Зарипов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №1. С.261-274. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p261-274_KuzeevIR_ru.pdf.
- 37. Кузеев, И.Р. Оценка адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик для определения ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования / И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, О.Г. Кондрашова // НТЖ «Нефтегазовое дело». – Уфа, 2006. - Т.1, - №4. – С.124-133.
- Кузеев, И.Р. Сложные системы в природе и технике / И.Р. Кузеев, Г.Х. Самигуллин, Д.В. Куликов, М.М. Закирничная, Н.В. Мекалова. –Уфа: Изд-во УГНТУ, 1997. –227 с.
- 39. Кузеев, И.Р. Формирование отклика электромагнитного сигнала в процессе разрушения оболочковой конструкции/ И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, А.Н. Тепсаев, А.В. Самигуллин, В.А. Гафарова// SOCAR PROCEEDINGS.- 2015. –Т. 4, №4. С. 75-80.
- 40. Кузеев, И.Р. Электромагнитная диагностика оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств: учебное пособие / Кузеев И.Р., Баширов М.Г. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 294 с.

- 41. Кулеев, В.Г. О возможности использования зависимости остаточной намагниченности от упругих напряжений для их неразрушающего контроля в стальных ферромагнитных конструкциях / В.Г. Кулеев, Л.В. Атангулова, Г.В. Бида // Дефектоскопия. –2000. №12. –С. 7-19.
- Лидер В. В. Фазочувствительные рентгеновские методы характеризации конденсированных сред. Учебное пособие. – М.: Изд-во Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, 2009. – 89 с.
- 43. Майр, П. Основы поведения стали при циклических нагрузках. Стадия 1, предшествующая распространению трещины. С. 144-173 // В кн. Поведение стали при циклических нагрузках. Под ред. В. Даля. Пер. с нем. Под ред. В.М. Геминова. – М.: Металлургия, 1982. – 568 с.
- 44. Маннапов, Р.Г. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования / Р.Г. Маннапов // Химическая промышленность. –1991. №10. –С. 53-55.
- 45. Махутов, Н.А., Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов / Н.А. Махутов, В.Н.Пермяков. – Новосибирск: Наука, 2005. - 515 с.
- 46. Можаровський М.С. Теорія пружності, пластичності і повзучості: Підручник. – К.: Вища шк., 2002. – 308 с.
- 47. Наумкин, Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемая в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Наумкин Евгений Анатольевич. – Уфа, 2011. – 250 с.
- 48. Наумкин, Е.А. Оценка предельного состояния стали по параметрам переменного электрического сигнала / Е.А. Наумкин, Т.Р. Бикбулатов, М.И. Кузеев // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2011. №5. URL: http://www.ogbus.ru/authors/NauiTikiii/NauiTikin_1.pdf
- 49. Никитина Н. Е., Казачек С. В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин //Вестник научно-технического развития. 2010. № 4 (32). С. 18–28.
- 50. Оксогоев, А.А. Стадийность пластической деформации металлических материалов с позиции фрактальной геометрии / А.А. Оксогоев // Вестник Томского университета. Бюллетень оперативной научной информации. –Томск: Издво ТГУ, 2005. –№5. –С. 16-22.
- 51. Оперативное определение остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии /Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В. и др. //В мире неразрушающего контроля. 2005. № 1. С.10 13.
- 52. Остаточные напряжения в элементах авиационных конструкций, выполненных из сплава 1420 /А. Г.Братухин, Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак и др. //Автоматическая сварка. 1995. № 3. С. 10 – 13.
- 53. ПБ 03-593-03. Правила організації і проведення акустико-эмиссионного контролю посудин апаратів, котлів і технологічних трубопроводів. ГУП "НТЦ "Промислова безпека".
- 54. Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Маслов Л.Г. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости. // Металловедение и термическая обработка металлов. N5. 2008. С. 28–35.
- 55. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. М.: Мир, 1972. 408 с.

- 56. Попова Н.А., Жулейкин С.Г., Игнатенко Л.Н. и др. Образование градиентных структур в перлитной стали при эксплуатации // Вестник Тамбовского Университета. - 2003. -Т.8, №4.-С.589-590.
- 57. Расторгуев Д.А., Драчев О.И., Бобровский А.В. Способ диагностики вибрационной обработки маложестких деталей. // Высокие технологии в машиностроении. Материалы научно-технической конференции (19.11.2002 – 21.11.2002). Самара. 2002. С. 216 – 217.
- 58. Рентгенографическое исследование остаточных напряжений, возникающих после импульсной лазерной закалки сталей. /В. С. Великих, И. Н. Воронов, В. П. Гончаренко и др. //Физика и химия обработки материалов. 1982. №6. С. 138–143.
- 59. Самигуллин, А.В. Выявление потенциально опасных зон по распределению магнитного поля в материале оболочковой конструкции, подверженной циклическому нагружению/ А.В. Самигуллин, А.Н. Тепсаев, Е.А. Наумкин // Остаточный ресурс нефтезаводского оборудования: сб. тр. Междунар. науч.техн. конф.- Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014.- С.228-232.
- 60. Соломатин В. Е., Новоселова Т. М. Опыт применения рентгеновского метода определения остаточных напряжений в сварных соединениях //Автоматическая сварка. 1982. № 2. С. 72–73.
- 61. Сунцов, С.И. Опыт использования метода магнитной памяти металла в ООО «Центр технической диагностики» / С.И. Сунцов, Д.А. Некрасов, Д.В. Олюнин // Контроль напряженно-деформированного состояния промышленного оборудования и металлоконструкций при оценке остаточного ресурса // Международный семинар. Сборник материалов под ред. председателя координационного совета ТК-132, д-ра техн. наук, профессора Дубова А.А. –М.: ООО «Энегродиагностика», 2005. –С. 76–78.
- 62. Теплинский, Ю.А. Оценка механических свойств и микроструктуры ферромагнетиков по магнитным характеристикам / Ю.А. Теплинский, Р.В. Агиней, И.Ю. Быков, Ю.В. Александров // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. –2004. - №7. –С. 5-7.
- 63. Трощенко, В.Т. Некоторые особенности роста усталостных трещин на различных стадиях их развития / В.Т. Трощенко // Проблемы прочности. 2003. №6. С. 5-29.
- 64. Тяпунина Н.А., Ломакин А.Л., Благовещенский В.В. Исследование диссипации энергии, обусловленной размножением дислокаций под действием ультразвука, методом моделирования на ЭВМ // Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов и сплавов. -Тула: Изд.ТПИ, 1985.-173 с
- Филинов, М.В. Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов / Филинов М.В., Фурсов А.С, Клюев В.В. // Контроль. Диагностика. - 2006. -№8. – С. 6-16.
- 66. Чернышев, А.В. Особенности формирования высших гармонических составляющих при перемагничивании тонколистовых образцов полем накладного преобразователя / А.В. Чернышев // Дефектоскопия. – 1995. - №8. – С. 89-93.
- 67. Шарипкулова, А.Т. Разработка метода оценки предельного состояния металла технологических трубопроводов по электромагнитным параметрам: дис.

канд. техн. наук: 05.26.03, 05.02.01 / Шарипкулова Айгуль Тимирьяновна. – Уфа, 2009. – 110 с.

- 68. Шаталов, А.А. Прогнозирование остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров / Шаталов А.А., Ханухов Х.М. Алипов А.В. // Безопасность труда в промышленности. - 2005. - №3. - С. 44-48.
- 69. D. Emter E. Macherauch. Die Streckgrenze des Ferrits an der Oberflache von Zugproben aus unlegierten Stahlen mit bis 1,15% C. Arch. Eisenhuttenwesen V.35. N9. 1964. 909–918.
- 70. Feeltner C.E. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture / C.E. Feeltner, J.D. Morrow // Trans. ASME (D). 1961. №1. p. 15-22.
- Hughes D. S., Kelly J. L. Second order elastic deformation of solids //Phys. Rev. 1953. Vol. 92. № 5. P. 1145–1149.
- IIW IV-239–78. Effect of welding parameters and prevention of defects in deep penetration electron beam welding of heavy section steel plates /T. Shida, H. Kita, H. O. Kamura, Y. Kawada.
- M. N. Bassim M. Veillette. Acoustic Emission Mechanisms in Armco Iron. Materials Science and Engineering V.50. 1981.285–287.
- 74. NOESIS. Опис спеціалізованого програмного пакету для обробки акустикоемісійних даних. Розробка компанії Envirocoustics ABEE.
- 75. Smith R. T. Stress-induced anisotropy in solids the acousto-elastic effect //Ultrasonics. 1963. № 1. P. 135–147.

Розділ 2

СТРУКТУРНО-КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ

Характерною особливістю стану структури системи у такому разі ϵ хаотичність, як наслідок локальної нестійкості [37]. Головна ж риса хаотичних систем полягає в тому, що мале обурення початкових умов для динамічної змінної, або ж мала зміна параметрів самої системи приводить до непередбачуваності результуючої поведінки за кінцевий час [46], який визначається як ризик руйнування.

В даний час на зміну уявленню про структурні зміни в навантажуваних системах, як про виключно деградаційний процес приходить розуміння його еволюційної ролі [48, 50]. У цьому сенсі процеси, що супроводжують накопичення пошкоджуваності в системі, є складними, незворотніми, розгалуженими, багатоетапними і багатомасштабними процесами [50], в результаті яких на зміну початковій структурі, мікрогеометрії, физико-механическим властивостям приходять нові структури, пристосовані до найбільш ефективного функціонування в існуючих умовах [25]. Таким чином, первинні деструкційні кінетичні процеси слід розглядати як перехідну стадію в загальному еволюційному процесі, а руйнування матеріалу - як завершальну фазу, що відповідає повному вичерпанню його ресурсу [30]. Схема накопичення пошкоджуваності й руйнування може бути описана наступною послідовністю: «механічна дія - деструкційні процеси - еволюційні (акомодації) процеси - досягнення граничного стану - руйнування». У загальному випадку дисипація енергії для поверхневих шарів відбувається за декількома напрямами [15, 19, 20, 190, 40, 48], спрощена схема яких представлена на рис. 2.1 (зліва орієнтовно вказані характерні масштабні рівні і тимчасові параметри вказаних процесів). Для внутрішніх ділянок процес подібний, але він не супроводжується зовнішніми проявами і тому більш складний для експериментального вивчення, тому автори будуть використовувати приклади деградації поверхневих шарів для ілюстрації процесів, що відбуваються у всіх ділянках.



Рис. 2.1. Схема розвитку дисипативних процесів у поверхневих шарах

В цілому точне уявлення про структуру системи, що зазнає перетворення в процесі накопичення пошкоджуваності, можна отримати, розглядаючи її як синергетичну систему [24, 57]. Такий підхід був застосований в попередньому розділі. До таких систем відносяться відкриті термодинамічні системи, що знаходяться далеко від рівноважного стану, фундаментальною властивістю яких є здібність до самоорганізації, гомеостазу і адаптації до зовнішніх умов [11, 12]. Гомеостазіс заснований на принципі мінімуму виробництва ентропії Гленсдорфа-Пригожина і направлений на оптимізацію стану системи в енергетичному фазовому просторі за рахунок пріоритетної активації малоенергоємних дисипативних механізмів [55]. Це дозволяє системі максимально зберігати стійкість під час вступу до неї великих потоків енергії. Цей принцип ранжирує дисипативні механізми і створює ієрархію дисипативних систем, що послідовно зростає в просторових і тимчасових масштабах, що визначають їх еволюцію (рис. 2.2) [24].

У попередньому розділі ми розповсюдили цей принцип на фрактальний алгоритм накопичення пошкоджуваності в представленні навантажуваного середовища як нелінійної динамічної системи.

Природно, що в такій загальній постановці використання кінетичних методів стає адекватним для опису виниклої фізичної картини прийомом, що дозволяє обгрунтовано підійти до вирішення практичних завдань інженерного характеру. У даному розділі показано, яким чином елементи кінетики включаються в динамічне завдання.



Рис. 2.2. Схема розвитку процесу накопичення пошкоджуваності під час тертя

Повний опис процесу на основі представлення ієрархічно супідрядного статистичного ансамблю дефектів в кінетичній постановці завдання вимагає вирішення наступних завдань:

1) розвиток кінетичної картини утворення нового структурного рівня в схемі накопичення пошкоджуваності;

2) опис механізму накопичення пошкоджуваності;

3) опис розвиненого структурного рівня, що має значну щільність властивих йому дефектів.

Відповідно до вказаного розділення побудовано виклад матеріалу. У кожному з даних випадків спочатку викладається теоретична схема, в рамках якої досягнутий якнайповніший опис, а потім проводиться зіставлення з модельними уявленнями.

2.1. Розвиток кінетичної картини утворення нового структурного рівня в схемі накопичення пошкоджуваності в системі

У цьому підрозділі дається математичний опис кінетики процесу накопичення пошкоджуваності на основі синергетичного підходу в рамках концепції перебудовуваного потенційного рельєфу [49, 53].

Адекватне математичне представлення кінетики процесу дається дифузійним формалізмом [18, 54]. При цьому встановлення когерентного зв'язку в ансамблі дефектів приводить до колективних ефектів, що не дозволяють розглядати процес звичайним способом. У міру формування фрактальності реалізується режим, в якому необхідно враховувати процеси встановлення модульованої структури в деформаційному полі мінімально стійких структурних елементів, що відповідає закономірностям фазового переходу другого роду [58]. Для адекватного опису цієї стадії слід використовувати синергетичний підхід [24]. Викладу позначеної картини присвячений пункт 2.1.1. У пункті 2.1.2 показано, що такий підхід, що спирається на аналіз колективних ефектів в синергетичній схемі, дозволяє ввести в аналіз конкретний механізм накопичення пошкоджуваності на основі формалізму випадкового броунівського блукання і розглядати багаторівневий сценарій розвитку відмови як послідовний розвиток кластерної фрактальної структури.

З іншого боку, слід мати на увазі, що фрактальна структура практично не піддається теоретичному дослідженню стандартними методами статистичної фізики. Проблема вирішується описом структур в термінах ренормгрупи [28]. У пункті 2.1.3 процес утворення кластера пошкоджень розглядається в рамках універсальних закономірностей критичних процесів перколяції.

2.1.1. Фрактальна модель ієрархічно супідрядного процесу накопичення пошкоджуваності

Розуміння того факту, що відмова системи є багатомасштабним ієрархічним процесом накопичення пошкоджуваності дозволяє якісно правильно враховувати ризик раптової відмови і організовувати заходи щодо забезпечення безпеки системи з урахуванням ризику.

Еврістічність в даному випадку реалізується методологією синергетики як міждисциплінарного наукового напряму, що вивчає поведінку систем, що знаходяться далеко від термодинамічної рівноваги на порозі руйнування своєї структури [24, 57]. Моделюватимемо процес двовимірною гексагональною решіткою розміром L×L, горизонтальні шари якої умовно відповідають лініям рівня поверхні. У осередках решітки розташовані цілі числа, що характеризують локальний нахил поверхні (див. рис. 2.3). Якщо число перевищує одиницю, осередок оголошується нестійким і обсипається, що виражається в зменшенні на 2 числа, що стоять в ній, з одночасним збільшенням на 1 значень в двох осередках, що примикають до нього знизу.



Рис. 2.3. Клітинний автомат

Якщо збуреність середовища недостатня, то мінімально стійкі елементи МСЕ рідкісні, і обурення не може далеко розповсюдитися, тобто активність швидко затухає. Якщо, навпаки, збуреність досягла межі поблизу деякого значення, при якому концентрація мінімально стійких елементів дорівнює порогу перколяції, тобто точці виникнення з них нескінченного зв'язного кластера, то будь-яке обурення може розповсюджуватися по системі на нескінченну відстань, і система поводиться як єдине ціле.

Параметр порядку (кількість когерентно зв'язаних СЕ) починає набувати ненульового значення під час переходу керуючого параметра (середній нахил) через критичне значення, що означає появу у системи цілісних властивостей [39]. Критична точка розділяє хаотичний (докритичний) і впорядкований (надкритичний) стани, тому в ній будь-яка мала дія може зробити істотний вплив на систему.

Проте в найкритичнішій точці малі причини можуть приводити до великих наслідків. У найбільш наочній моделі «обсипання» [39], що описується даним алгоритмом, така ситуація виглядає наступним чином.

Лавина «обсипання» осередків розповсюджується строго зверху донизу, не зачіпаючи двічі один шар. Тому їх цілком можна охарактеризувати всього двома числами: площею області S, де відбулися обсипання, і тривалістю T (числом шарів порушених лавиною). Як показує комп'ютерне моделювання, розподіл лавини за площею і тривалістю має статечний вигляд [72] з показниками, відповідно, $\alpha_s \approx 0.33$ (див. рис. 2.4) і $\alpha_r \approx 0.5$.

Лінійна частина графіка, що представляє в подвійних логарифмічних координатах статечну залежність, має кут нахилу приблизно -1,33.

Горб в правій частині графіків відповідає тій лавині, яка обірвалася із-за досягнення нижнього краю решітки.



Рис. 2.4. Розподіл лавини за площею при різних розмірах решітки

На врізанні приведений кінцеворозмірний скейлинг розподілів. Графіки, отримані при різних L, збігаються при v \approx 1,50 і $\beta \approx$ 2,00.

Як видно з графіків, приведених на рис. 2.4, статечний вигляд щільності вірогідності порушується при великих значеннях аргументу. Тобто слід використовувати розподіл [72]

$$u(x) \sim x^{-(1+\alpha)} \cdot h(x/x_1), \qquad (2.1)$$

де функція h(y) приблизно постійна при $y \ll l$ і швидко убуває при великих y. Параметр x_1 характеризує величину подій, великих настільки, що вони вже не описуються статечною статистикою. Її порушення при $x \sim x_1$ обумовлено кінцівкою розмірів системи, із-за чого вона і не може породжувати скільки завгодно крупні події.

Для обліку впливу розмірів системи на форму розподілу зазвичай застосовується метод кінцеворозмірного скейлинга [33]. Він заснований на припущенні, що щільність вірогідності задається формулою

$$u(x) = L^{-\beta} \cdot g(xL^{-\nu}), \qquad (2.2)$$

де β і v – скейлингові показники, L – розмір системи, скінценність якого і обмежує область проміжної асимптотики, а g(y) – скейлингова функція, загальна для систем різного розміру.

Вигляд формули (2.2) обумовлений відсутністю у величини *х* власних характерних значень. Тому її характерні значення, визначувані розміром системи, залежать від нього масштабно-інваріантним чином [54]. Наприклад, характерний розмір крупної події є [72]

$$x_I \sim L^{\rm v}, \tag{2.3}$$

а середня подія складає

$$\overline{x} = \int x \cdot u(x) dx \sim L^{2\nu - \beta} \,. \tag{2.4}$$

Для еквівалентності формул (2.1) і (2.2) необхідно, щоб в проміжній асимптотиці функція *g* мала статечний вигляд

$$g(y) \sim y^{-(1+\alpha)}.$$

3 урахуванням цього формула (2.2) зводиться до

$$u(x) = L^{-\beta}g(xL^{-\nu})^{-(1+\alpha)} \sim x^{-(1+\alpha)}L^{\nu(1+\alpha)-\beta}.$$

А оскільки в проміжній асимптотиці щільність вірогідності не залежить від розміру системи, показники виявляються зв'язаними наступним скейлинговим співвідношенням

$$v(1+\alpha) = \beta. \tag{2.5}$$

Тобто розподіл актів крупних подій виявляє лінійну залежністю в логарифмічних координатах, що характеризують нестійку ситуацію з наростанням частки крупних подій і, тим самим, виявляє провісникові властивості масштабно-інваріантного розподілу поведінки визначальної ознаки [33, 39, 72].

Якщо при побудові графіків щільності вірогідності, відкладати по осі абсцис $x \cdot L^{-\nu}$, а по осі ординат – $u(x) \cdot L^{\beta}$, то графіки, що відповідають системам різного розміру, збіжаться (див. рис. 2.4). У такий спосіб можна з хорошою точністю визначити скейлингові показники, а через них за формулою (2.5) виразити і показник, для якого у разі розподілу лавини за площею виходить значення 0,33 [72].

У цьому підході ми об'єднали чисельні методи континуальної механіки і дискретний метод клітинних автоматів. Наслідком статечних розподілів, що описують систему, є її схильність до катастроф [38].

Моделюватимемо кінетику процесу накопичення пошкоджуваності відповідно до обгрунтованого вище механізму ієрархічної перебудови багатокомпонентною структурою елементів з кінцевим числом мір свободи, коли кожен елемент може знаходитися в одному з двох станів – не зруйнованому і зруйнованому [39].

Розглянемо відповідно до [72] ієрархічну систему, фрагмент якої зображений на рис. 2.5. Система розбита на рівні, які можна інтерпретувати як ступені деталізації опису (чим нижче рівень, тим детальніше), або як різні стадії розвитку процесу. Кожен елемент рівня i > 0 складається з трьох елементів попереднього рівня (i - 1).

Елементи системи можуть бути справні або дефектні (показані заливкою). Стан кожного елементу визначається станом створюючих його елементів попереднього рівня, а також його власною сприйнятливістю до дефектів.

Так, елемент із сприйнятливістю k буде дефектним, якщо дефектні не менше k його складових. Таким чином, можливі три типи елементів: з k = 1,2,3, тобто такі, що стають дефектними, якщо дефектна хоча б одна складова, якщо дефектні не менше двох складових і якщо дефектні всі три складові.



Рис. 2.5. Фрагмент ієрархічної системи

Позначимо долі елементів типу k в системі через S_k . При цьому, очевидно

$$s_1 + s_2 + s_3 = l. (2.6)$$

Зміна концентрації дефектних елементів *р* при підйомі на один рівень дається відображенням

$$p \to F(p) = s_1 \cdot (1 - (1 - p)^3) + s_2 \cdot (p^3 + 3p^2(1 - p)) + s_3 \cdot p^3$$
(2.7)

Знайдемо його нерухомі точки як коріння рівняння, переписавши останнє з урахуванням рівняння (2.7) у вигляді:

$$p \cdot (1-p) \cdot 3(s_1+ps_2) = p \cdot (1-p) \cdot (1+p).$$

Відображення (2.7) завжди має дві тривіальні нерухомі точки p = 0 і p = 1, що відповідають бездефектному і повністю дефектному станам, і критичну

$$p_c = \frac{l - 3s_l}{3s_2 - l},$$
 (2.8)

яка, щоб мати фізичний сенс, повинна задовольняти очевидній нерівності

$$0 < p_c < 1. \tag{2.9}$$

Стійкість нерухомих точок відображення (2.7) визначається величиною

$$|F'(p)| = 3 \cdot (s_1 \cdot (1-p)^2 + s_2 \cdot 2p(1-p) + s_3 \cdot p^2).$$

Якщо вона менше одиниці, то нерухома точпка стійка, якщо більше – нестійка, а рівняння

$$\left|F'(p)\right| = l \tag{2.10}$$

відповідає біфуркації, яка відбувається, коли зустрічаються дві нерухомі точки відображення. У разі відображення (2.7) тривіальні нерухомі точки обмежують діапазон фізично осмислених значень (2.9) критичної нерухомої точки (2.8). Отже, зміна стійкості цих нерухомих точок збігається з її появою або зникненням в інтервалі (2.9).

Для нерухомих точпок p = 0 і p = 1 рівняння (2.10) дає, відповідно, різноманіття $s_1 = 1/3$ і $s_3 = 1/3$, які ділять простір параметрів системи на чотири області, усередині яких стійкість нерухомих точок відображення (2.7) і їх взаємне розташування незмінні. Тобто, щоб визначити стійкість і положення точки, немає необхідності проводити громіздкі викладення, а досить розглянути по одному зручному прикладу з вже відомих областей простору параметрів. На рис. 2.6 зображені графіки виразу (2.7) для таких зручних випадків [33, 39, 72].

1. При $s_1 = 1$ і $s_3 = s_2 = 0$ для виникнення дефектного елементу досить, щоб хоч би одна з його складових була дефектною. Відповідно, єдина стійка нерухома точка відображення, і будь-яка ненульова концентрація дефектів на нижньому рівні приводить до дефектності всієї системи.

2. При $s_3 = 1$ і $s_2 = s_1 = 0$ для виникнення дефектного елементу необхідно, щоб всі його складові були дефектними. Відповідно, єдина стійка нерухома точка відображення, і будь-яка ненульова концентрація справних елементів на нижньому рівні гарантує справність всієї системи.

3. Якщо $s_2 = 1$ і $s_1 = s_3 = 0$, дефектний елемент виникає, якщо більше половини з його складових дефектна. При цьому обидва крайні значення p = 0 і p = 1 стійкі і стан системи в цілому визначається концентрацією дефектів на нижньому рівні. Якщо $p_0 < p_c < 1/2$, то система буде справна (що зводиться до варіанту 2), а якщо $p_0 > p_c$ – дефектна
(варіант 1). І лише у випадку $p_0 = p_c$ критична концентрація дефектів зберігатиметься від рівня до рівня.



Рис. 2.6. Зміна концентрації дефектних елементів при підйомі на наступний рівень

4. Якщо $s_2 = 0$ і $s_1 = s_3 = 1/2$, то система є сумішшю в рівних долях елементів двох різних типів: одні ведуть себе за правилом 1, підсилюючи дефекти, а інші – за правилом 2, пригнічуючи їх. При цьому критична точка стійка, і вірогідність дефектності системи в цілому p_c не залежить від концентрації дефектів на нижньому рівні, якщо $p_0 \neq 0$;1.

На рис. 2.7 приведена фазова діаграма для даної системи. Простір параметрів розпадається на чотири області (фази): дві, в яких одна тривіальна нерухома точка стійка, друга – нестійка, а критичної точки немає зовсім, і дві, в яких критична точка є (на рис. 2.7 залиті відтінками сірого).



Рис. 2.7. Фазові діаграми для ієрархічної системи в проекціях на осі $S_1 - S_3$

У разі $s_1 < 1/3$ (області 2 і 3) стійкий бездефектний стан p = 0. У разі $s_3 < 1/3$ (області 1 і 3) стійкий повністю дефектний стан $s_3 < 1/3$.

При одночасному виконанні цих умов між стійкими нерухомими точками p = 0 и p = 1 відображення (2.7) лежить його нестійка нерухома точка, що відповідає звичайній критичній поведінці (область 3). Якщо ж обидві умови порушуються, то між двома нестійкими станами виявляється стійке, що відповідає самоорганізованій критичності (область 4) [72].

Жирними точками відмічені випадки, що використовувалися для визначення взаємного розташування і стійкості нерухомих точок відображення. Його графіки для цих випадків наведені на рис. 2.6. Властивості системи, розглянуті в прикладах 1 і 2, де немає критичної точки, цілком передбачені і, отже, ця система не має ніякої небезпеки [39]. Варіант 3 відповідає звичайній критичній поведінці, коли для появи у системи цілісних властивостей потрібне спеціальне підстроювання, а варіант 4 – самоорганізованій критичності [39], що виникає за рахунок дії негативного зворотного зв'язку, який зменшує відхилення p_i від p_c при підйомі по рівнях.

Як відомо з теорії фазових переходів, такий стан утворюється критичним чином — впорядкована фаза розвивається як самоподібна структура, в якій відсутній характерний масштаб [24]. Формальна властивість самоподобія виражається однорідністю функції розподілу P(x) по амплітуді x, яка відповідає за впорядкування [39, 72]:

$$P(x/x_c) = x_c^{\alpha} P(x).$$
(2.11)

Відповідно до (2.11) зміна масштабу x_c випадкової величини x приводить до мультиплікативної зміни вірогідності її реалізації P, що характеризується показником α . Вводячи масштабовану змінну $y \equiv x/x_c$ і функцію розподілу, можна переписати (2.11) у вигляді

$$P(x) = x^{-\alpha} P(y), \qquad (2.12)$$

з якого виходить основна властивість самоподібних систем: у межі великих і малих значень стохастичної змінної x, коли функцію $P(y) = y^{\alpha}P(y)$ можна прийняти постійною, розподіл $P(x) = x^{-\alpha}P(y)$ набуває статечної форми [27, 57, 72].

Представлена кінетична картина відповідає польовому представленню попошкоджуваності [30, 35], виписаному з перших принципів, що доводить приналежність процесу накопичення пошкоджуваності до одного класу універсальності з фазовим переходом.

Згідно цієї моделі, систему утворюють розташовані у вузлах правильної решітки елементи, здатні перебувати в стані спокою або збудження. Якщо в даний момент часу елемент знаходиться в стані спокою, то в наступний дискретний момент часу він може з певною вірогідністю збудити кожен зі своїх найближчих за ієрархією сусідів. В результаті розігрується процес, що нагадує випадкове блукання. Таким чином, ми прийшли до твердження про утворення регулярної структури, тобто топології процесу накопичення руйнувань в просторі фрактального алгоритму процесу пошкоджуваності. Обернемо цей простір алгоритмів на простір механізмів дифузії дефектів, що характеризуються випадковим блуканням.

2.1.2. Особливості стохастичного опису

Скористаємося схемою [24]. Хай $p(\{r_i\}, \{\rho_i\}, t)$ - щільність вірогідності розподілу N часток, створюючих дану систему, в просторі координат. Якщо функція p відома, то мікроскопічний стан системи вважається за визначений. Розглянемо сукупність змінних $\{a_i\}$, що визначають макроскопічний стан тієї ж системи. У загальному випадку маємо $a_i = a_i(\{r_j\}, \{p_j\})$. Хай $P(\{a_i\})\{da_i\}$ - вірогідність того, що система знаходиться в такому макроскопічному стані, в якому всі змінні a_i поміщені в інтервалі від $\{a_i\}$ до $\{a_i + da_i\}$. Ця вірогідність виражається через функцію p таким чином:

$$P(\{a_i\},t)\{da_i\} = \int_{\{a_i,a_i+da_i\}} \{d\rho_j\} p(\{r_j\},\{\rho_j\}t). (2.13)$$

Якщо розкласти P поблизу деякого стандартного стану $\{a_i^0\}$, то рівняння (2.13) може дати вірогідність різних флуктуацій поблизу цього стану.

Скористаємося методом стохастичної теорії [24, 27], яка полягає в тому, що обумовлені флуктуаціями зміни змінних a_i розглядаються, як випадкові процеси, для яких характерна відсутність однозначної залежності цих змінних від часу, що грає роль незалежної змінної. Таким чином, спостереження над різними ансамблями пошкоджень, що накопичуються, в системі дає різні функції $a_i(t)$. Звідси витікає, що необхідно розглядати відповідні розподіли вірогідності, такі як

- вірогідність знаходження $\{a\}$ в інтервалі ($\{a\}, \{a + da\}$) у момент часу t:

$P_{l}(\{a\},t)\{da\};$

- вірогідність знаходження $\{a\}$ в інтервалі ($\{a_1\}, \{a_1 + da_1\}$) у момент часу t_1 і в інтервалі ($\{a_2\}, \{a_2 + da_2\}$) у момент часу t_2 :

$$P_2(\{a_1\}t_1;\{a_2\}t_2)\{da_1\}\{da_2\}, \qquad (2.14)$$

де

$$\sum_{\{a_j\}} P_j(\{a_l\}t_l; \dots, \{a_j\}t_j) = l, \quad P_j \ge 0 \quad (j = l, 2, \dots)$$
(2.15)

Оскільки ми розглядаємо процес, який допускає розгляд таких випадків, коли результат даної події може залежати від результату попереднього, введемо умовну вірогідність $W_2 \langle \{a_1\}t_1; | \{a_2\}t_2\rangle$, а також нову вірогідність, пов'язану з P_i в (2.14) таким чином:

$$P_1 = W_1;$$

$$P_2(\{a_1\}t_1; \{a_2\}t_2) = W_2\langle\{a_1\}t_1; |\{a_2\}t_2\rangle \times P_1(a_1\}, t_1) \quad (2.16)$$

і так далі;

$$\sum_{a_2} W_2 \langle \{a_1\} t_1 | \{a_2\} t_2 \rangle = 1, \quad W_2 \ge 0$$
 (2.17)

і так далі.

Сукупність чисел, що задовольняють (2.17), визначає стохастичну матрицю умовної вірогідності.

$$W_{2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & . & ... & 0 & 0 & 0 \\ q & 0 & p & . & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 & p & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & . & . & . & ... & q & 0 & p \\ 0 & . & . & . & ... & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$
(2.18)

де p і q - вірогідність переміщення на одиничну відстань частинки в позитивному або негативному напрямі відповідно.

Для такого процесу рівняння відносно P_2 визначається залежністю Чепмена-Колмогорова [24]:

$$P_{2}(\{a_{1}\};\{a_{2}\}t) = \sum_{\{a\}} W_{2}\langle\{a\}|\{a\}\Delta t\rangle \times P_{2}(a_{1}\};\{a\},t-\Delta t)$$
(2.19)

для будь-яких Δt з інтервалу $0 \le \Delta t \le t$.

Для спрощення викладення вважатимемо [24], що змінні {*a*} дискретні. Відзначимо, що через визначення W_2 в (2.16) рівняння (2.19) нелінійне відносно P_2 . Якщо Δt в (2.19) визначає тривалість елементарної події, тоді $W_2(\Delta t)$ є вірогідність того, що за час Δt система зробить один перехід із стану {*a*} в стан {*a*₂}. Оскільки ми розглядаємо безперервні в часі процеси, зручніше використовувати вірогідність переходу в одиницю часу. Для цього припустимо що $k \equiv \{a\}, l \equiv \{a_2\}$. Тоді для вірогідності переходу в одиницю часу між двома різними станами $(k \neq l)$ маємо $w_{kl} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{W_2 \langle k | l, \Delta t \rangle}{\Delta t}$, а для вірогідності переходу в одиницю часу із стану *k*:

ницю часу із стану $k: -w_{kk} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1 - W_2 \langle k | k, \Delta t \rangle}{\Delta t}.$

Шляхом підсумовування (2.19) по $\{a_i\}$ і розкладання $P(k, t - \Delta t)$ в ряд Тейлора поблизу P(k, t) отримуємо

$$\frac{dP(k,t)}{dt} = \sum_{l} w_{ik} P(l,t) - \sum_{l \neq k} [w_{lk} P(l,t) - w_{kl} P(k,t)].$$
(2.20)

Таким чином, зміна P в часі обумовлена конкуренцією між накопичувальними членами, що відповідають переходам $l \rightarrow k$, і членами, що відображають втрати при переходах $k \rightarrow l$.

Випадкові флуктуації забезпечують постійне зростання вірогідності дефектоутворення, а дефектоутворення, дисипіруя флуктуючую енергію, зменшує цю вірогідність. Змоделюємо ситуацію накопичення дефектності.

Введемо в рівняння (2.20) змінні, що описують базову модель накопичення пошкоджуваності, що характеризують конкуруючі процеси накачування і розсіювання обурень. Ці змінні відповідають числам X_i , що характеризують певний рівень внутрішньої початкової дефектності ієрархічного середовища. В окремій стадії процесу обурення розповсюджуються на вищі рівні ієрархії гілчастого процесу за рахунок вичерпання можливостей дисипірувати активність гілками (розривами), що лежать нижче. Рівняння (2.20) набуває наступного вигляду:

$$\frac{dP(\{X_i\},t)}{dt} = \sum_p w(\{X_i - r_{ip}\} \to \{X_i\}) P(\{X_i - r_{ip}\},t) - \sum_p w(\{X_i\} \to \{X_i + r_{ip}\}) P(\{X_i\},t).$$
(2.21)

Це рівняння описує еволюцію функції $P({X_i}, t)$ для процесу пошкоджуваності системи.

Щоб знайти рішення його в асимптотичній межі при $X_i \to \infty$, помножимо обидві частини рівняння на Q і проінтегруємо по $\{X_i\}$. Величини P і W грають роль щільності вірогідності. В результаті отримаємо

$$\int \{dX_i\}Q(\{X_i\})\frac{\partial P(\{X_i\},t)}{\partial t} =$$

$$\int \{dX_i\}Q(\{X_i\})\sum_p w(\{X_i - r_{ip}\} \rightarrow \{X_i\})P(\{X_i - r_{ip}\},t) -$$

$$-\int \{dX_i\}Q(\{X_i\})\sum_p w(\{X_i\} \rightarrow \{X_i + r_{ip}\})P(\{X_i\},t) \cdot$$

Тепер розкладемо величину $Q(\{X_i\})$ в першому членові правої частини в ряд Тейлора поблизу $Q(\{X_i - r_{ip}\})$. З урахуванням умови (2.16) після переходу до нових змінних інтеграції $X'_i = X_i - r_{ip}$ маємо

$$\int \{dX_j\}Q(\{X_j\})\frac{\partial P(\{X_j\},t)}{\partial t} =$$

$$\sum_p \int \{dX_i\} [\sum_i w(\{X_j\} \to \{X_j + r_{ip}\})P(\{X_i - r_{ip}\},t)\frac{\partial Q}{\partial X_j} +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{ik} w(\{X_j\} \to \{X_j + r_{jp}\})r_{ip}r_{kp}\frac{\partial^2 Q}{\partial X_i \partial X_k} + O(r_{ip}^3)]P(\{X_j\},t) +$$

Цей вираз є розкладанням Крамерса-Мойела, в якому моменти переходу $a_{l;i_1,i_2,...,i_n,...}$ визначаються за допомогою наступного співвідношення [24]:

$$a_{l;i_{1},i_{2},...,i_{l}}(\{X_{i}\}) = \frac{l}{l!} \sum_{p} w(\{X_{i}\}) \rightarrow \{X_{i} + r_{ip}\}) \prod_{k=l}^{l} r_{i_{kp}} \cdot$$

Для марківського процесу маємо $a_i(\{X_i\}) = 0$, тоді рівняння приймає вигляд:

$$\int \{dX_j\}Q(\{X_j\})\frac{\partial P(\{X_j\},t)}{\partial t} =$$
$$\int \{dX_j\}P\left[\sum_i a_{1,i}(\{X_j\})\frac{\partial Q}{\partial X_i} + \sum_{ik} a_{2,ik}(\{X_j\})\frac{\partial^2 Q}{\partial X_i \partial X_k}\right].$$

Виконуючи праворуч від знаку рівності інтеграцію по частинах, можна записати наступне рівняння

$$\frac{\partial P(X_i\},t)}{\partial t} = -\sum_i \frac{\partial}{\partial X_i} a_{1,i}(\{X_i\}) P(\{X_i\},t) + \sum_{ij} \frac{\partial^2}{\partial X_i \partial X_j} a_{2,ij}(\{X_i\}) P(\{X_i\},t) \cdot$$

Це рівняння рівносильне рівнянню для випадкового броунівського блукання рівнянню Колмогорова – Фоккера – Планка [2]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -2\zeta \frac{\partial P}{\partial x} + D \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} ,$$

у якому D - коефіцієнт дифузії, ζ - коефіцієнт зносу.

Таким чином, виходячи з [24], ми прийшли до необхідності опису механізму пошкоджуваності на основі формалізму випадкового броунівського блукання. Характер такого типу флуктуацій в системі відображається механізмом перколяції [28].

Скористаємося цим інструментом для подальших міркувань.

2.1.3. Перколяційна феноменологія накопичення пошкоджуваності

Вище ми представили механізм накопичення пошкоджуваності у вигляді реалізації процесу на фрактальній моделі, елементарним актом якого є стохастичне блукання активності мінімально стійких елементів, на тлі якого і протікає процес.

Розглянемо його з позиції кінетики перколяційних процесів, в яких найнаочніше знаходять своє віддзеркалення універсальні закономірності, властиві нелінійним динамічним системам, до яких ми віднесли деградуючу систему.

Принциповим є питання: наскільки загальними виявляються властивості спостережуваної структури алгоритму напрацювання на відмову і структурою перколюючого кластера, що володіє універсальними властивостями фазового переходу. Для цього розглянемо самоподібність перколяційного кластера [28]. Розглядатимемо прийняту раніше трикутну схему (рис. 2.5).

Оскільки самоподібність тісно пов'язана з фрактальною структурою кластера, то їй за допомогою ренорміровки можна додати кількісний характер, аналогічний залежності, отриманій раніше для гілчастого процесу. Суть цієї ренорміровки полягає в наступному [28].

Кожен вузол решітки має однакове число гілок, або зв'язків. Т.ч., накопичення пошкоджуваності відповідає зростанню околиці решітки, які поводяться так, ніби її розмірність нескінченна. Зрозуміло, що нескінченність в реальності не реалізовується – система має кінцевий запас надмірності. Проте, будучи ієрархічною конструкцією, нескінченна решітка дозволяє обчислити поріг перколяції, тобто вірогідність того, що даний вузол решітки належить нескінченному кластеру (поріг критичності), причому зробити це виходячи з міркувань, заснованих на міркуваннях подібності.

Для цього заміні кожних трьох сусідніх вузлів в решітці одним поставимо у відповідність факт утворення нового рівня в схемі гілчастого процесу (рис. 2.8).

Вірогідність заповнення вузлів початкової решітки рівна p. Умовою зайнятості надвузла є, якщо принаймні два з трьох вузлів зайняті (умова $s_2 = s_3 = 1/2$ для схеми гілчастого процесу. Вірогідність того, що зайнято всі три вузли, рівна p^3 , а вірогідність того, що зайнято рівно два вузли з трьох, рівна $\frac{3}{2}p^2(1-p)$. Отже, для вірогідності заповнення для надвузлів [28]

$$p' = p^3 + 3p^2(1-p)$$

У критичній точці $p = p_c$ повинна виконуватися рівність p' = p. Таким чином, знаходимо три критичні точки $p_c = 0, 1/2, 1, 3$ яких нетривіальна тільки точка ¹/₂. Цей результат, отриманий за допомогою перенормування [28], з точністю відповідає результату для гілчастої схеми накопичення пошкоджуваності.



Рис. 2.8. (а) – кластери на порозі кластеризації на трикутних решітках; (б) – огрублення трикутних решіток; зайняті вузли зображені чорними кухлями, незайняті - світлими. Групи з трьох вузлів утворюють блоки, позначені заштрихованими трикутниками

Як відомо перколяційні процеси засновані на закономірностях хвильових процесів [28], пов'язаних з просторово-часовими змінами хвильового пакету, що і дозволяє реалізувати перехід «дискретністьбезперервність», що додає фазове трактування, при якому рівняння еволюції системи є операторами фазового стану. Таке трактування дозволяє з кінетичної точки зору розглядати процес пошкоджуваності як процес дифузії дефектів в перколіруючому середовищі, де випадковість процесу відповідає випадковому блуканню дефектів [53].

Дана гіпотеза добре укладається в рамки уявлень про потенційний рельєф, якісна і кількісна картина якого представлена в [29].

Існує фундаментальна точка зору на цю проблему [29]. Складна система складається з великого числа взаємодіючих об'єктів. Для цих систем параметри стану слід розуміти в статистичному сенсі, тобто в системі генеруються внутрішні відхилення — флуктуації, обумовлені внутрішньою динамікою системи у вигляді локалізованої маломасштабної події — дефекту.

У зв'язку з тим, що теорія перколяції належить до критичних явищ в неврегульованих середовищах, поблизу порогу перколяції структура кластерів володіє властивістю деякої універсальності, що дозволяє сподіватися на отримання функціональності опису процесу. Таким чином, динаміка накопичення дефектності володіє певною симетрією і зумовлює існування у системи деякої інваріантної властивості. Існування подібного зв'язку є дуже ефективним і дає можливість, поперше, глибше проникнути в природу виникнення відмови системи і дозволяє запропонувати методи контролю технічного стану об'єктів експлуатації, засновані на масштабно-інваріантних властивостях диссипативных структур.

2.2. Синергетика утворення структурного рівня

Відновлення сполучної ланки між топологією і кінетикою, виключеною з розгляду в попередньому розділі на етапі огрублення послідовного розгляду проблеми, вимагає використання методів, які дозволяють представити навантажуване середовище як синергетичну систему [53, 74].

Необхідність залучення синергетики обумовлена тим, що вона надає евристичний метод дослідження систем, схильних до кооперативного механізму перетворень в процесі еволюції, що відбуваються в них, які супроводяться утворенням просторових і часових структур [24].

2.2.1. Термодинамічні закономірності прояву взаємодіючих процесів обурень, що накопичуються

Необхідно з'ясувати, яким чином ближній порядок схеми накопичення пошкоджуваності, описаний вище, набуває дальньодіючого характеру.

Приведений вище розгляд простого сценарію попарного об'єднання кластерів в ультраметричному просторі, в рамках якого частка вузлів, що визначає ступінь перебудови потенційного рельєфу стану системи, грає роль керуючого параметра [53], виявило відношення досліджуваного процесу до одного класу універсальності з процесами фазового переходу, що передбачають, окрім керуючого параметра n, розгляд параметра порядку \mathcal{E} , і зв'язаного поля σ [49], величини яких визначають поведінку колективної моди. Роль параметра порядку, що задає відгук системи на зовнішню дію, грає величина колективної моди, амплітуда якої у феноменологічному підході, що викладається нижче, співвідноситься з розміром кластера когерентно зв'язаних збуджених структурних елементів (СЕ). Сама фізична постановка завдання підказує далі, що у якості зв'язаного поля

слід узяти величину, обумовлену збудженням (поляризацією) системи СЕ в результаті процесу розділення їх множини на підмножини, визначуваної сприйнятливістю СЕ [49].

Після того, як встановлений параметр порядку, стає застосовним весь могутній апарат теорії динамічних систем і теорії фазових переходів. Швидкість зміни керуючого параметру \dot{n} задається з одного боку інтенсивністю диссипативных процесів, що характеризуються часом релаксації τ_n , а з іншої – впливом колективної моди, який визначається її амплітудою ε і зв'язаним полем σ [53]:

$$\dot{n} = \frac{n_e - n}{\tau_n} - g_n \varepsilon \sigma \,. \tag{2.22}$$

Тут n_e - значення, що задається зовнішніми умовами; g_n - позитивна константа зв'язку. Перше з рівнянь, що визначають поведінку колективної моди, зводиться до відомого рівняння Максвелла для в'язкопружнього середовища [53]:

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{\varepsilon}{\tau} + \frac{\sigma}{\eta}.$$
(2.23)

Тут перший член відповідає релаксації деформації з часом τ ; другий - описує перебіг середовища під дією напруги σ ; η - сдвигова в'язкість. У стаціонарному стані при $\dot{\varepsilon} = 0$ рівняння (2.23) зводиться до закону Гука $\sigma = \mu \varepsilon$, де модуль зрушення μ задає час релаксації τ

$$\tau = \frac{\eta}{\mu}.$$
 (2.24)

Відповідно, рівняння для швидкості зміни пружної напруги записується у вигляді [53]

$$\dot{\sigma} = -\frac{\sigma}{\tau_{\sigma}} + g_{\sigma} \varepsilon n , \qquad (2.25)$$

де $\tau_{\sigma}, g_{\sigma}$ - позитивні константи, перша з яких визначає процес релаксації напруги, друга – їх зростання за рахунок перебудови потенціалу.

Система (2.23), (2.25), (2.22) збігається з рівняннями, що описують каскадний процес перебудови структури системи [1, 4, 14]. Негативний характер нелінійності в рівнянні (2.22) означає зменшення частки вузлів при збільшенні пружної енергії колективної моди; відповідно, нелінійний доданок в рівнянні (2.25) описує позитивний зворотний зв'язок, який є причиною самоорганізації середовища [53].

Вказана рівність формує повну систему рівнянь, яка визначає самоузгоджену поведінку системи в процесі накопичення пошкоджуваності [49]. Діссипатівний характер фазового переходу [55] реалізується при співвідношенні часів релаксації $\tau_{\sigma}, \tau_n \ll \tau$, згідно якому повільна еволюція параметра порядку $\varepsilon(t)$ пригнічує швидкі зміни величин $\sigma(t), n(t)$. Тоді [53]

$$n_c \equiv \mu / A_{\sigma} = \eta / \tau \tau_{\sigma} g_{\sigma}, \quad A_{\sigma} \equiv \tau_{\sigma} g_{\sigma}.$$
(2.26)

Часова залежність параметра порядку $\mathcal{E}(t)$ визначається рівнянням [53]

$$\tau \dot{\varepsilon} = -\frac{\partial V}{\partial \varepsilon}.$$
 (2.27)

При постійних значеннях τ , η синергетичний потенціал $V(\varepsilon)$ зводиться до розкладання [47] (рис. 2.9):

$$V \approx \frac{A}{2}\varepsilon^{2} + \frac{B}{4}\varepsilon^{4}, \qquad (2.28)$$
$$A \equiv 1 - \frac{n_{e}}{n_{c}}, \quad B \equiv \varepsilon^{-2}.$$

З рис. 2.9 ясно, що згідно (2.28), характер стаціонарного стану, що відповідає умові $\partial V / \partial \varepsilon = 0$, визначається співвідношенням між величиною параметра n_e , що задається зовнішніми умовами, і критичним значенням n_c , що визначається рівністю (2.26). У підкритичному режимі

 $n_e < n_c$, коли залежність (2.28) є монотонно зростаючою, маємо стаціонарний стан і гідродинамічна мода відсутня. У протилежному випадку, коли в залежності (2.28) синергетичний потенціал набуває мінімуму, і система спонтанним чином переходить у впорядкований стан, що відповідає схемі фазового переходу другого роду. Як відомо з теорії фазових переходів, такий стан утворюється критичним чином – він розвивається як самоподобная структура, в якій відсутній характерний масштаб [53].



Рис. 2.9. Вид нерівноважного потенціалу поблизу переходу другого роду і біфуркація вирішення рівнянь стану

2.2.2. Навантажуваний матеріал як синергетична система

Універсальність висновків, що узагальнюються на будь-яку систему, що випробовує безперервний фазовий перехід, полягає в тому, що вказаний перехід представлений як самоорганізація ансамблю часток, схильних до зовнішнього навантаження. Підхід грунтується на системі Лоренца, що відповідає простому польовому представленню середовища [49], що самоорганізується, де реалізується масштабна інваріантність. Як було показано, пропонована модель пошкоджуваності належить до подібного роду схемам і тому до неї застосуємо весь інструмент теорії нелінійної динаміки.

З цієї універсальності, зокрема, витікає, що для виявлення критичності стану системи можна використовувати прості моделі, що демон-

струють основні шляхи переходу до хаосу. В рамках цих моделей забезпечується адекватне фізичному механізму отримання кількісних характеристик універсальної поведінки, що відображає картину виникнення дивного аттрактора.

Динамічний хаос подібно до випадкового процесу вимагає статистичного опису [36].

Хаотична динаміка за визначенням означає наявність перемішування і, отже, позитивність ентропії Колмогорова [58].

Важливо відзначити, що будь-яка система з перемішуванням є ергодичною. Для хаотичних динамічних систем розчіплення кореляцій в часі пов'язане з експоненціальною нестійкістю хаотичних траєкторій і з властивістю системи породжувати позитивну ентропію Колмогорова [63, 66].

Експериментальні дослідження [26] окремих хаотичних систем свідчать про складну поведінку кореляційних функцій, яка визначається не тільки позитивними показниками Ляпунова, але й закономірностями хаотичної динаміки системи [58]. Важливо виявити конкретні характеристики хаотичної динаміки, що відповідають за протікання великомасштабної події.

Вище у якості гіпотези була розглянута можливість такого уявлення в рамках положення теорії турбулентних структур і принципу скейлинга Колмогорова [33, 66]. Даний етап досліджень доводить запропонований підхід.

При моделюванні фазових переходів можливі різні підходи. Моделі одного типу використовують уявлення про параметри порядку або інших скалярних величинах, що характеризують структуру середовища [53], моделі іншого типу не використовують це уявлення [15]. В [68] був запропонований підхід до моделювання нерівноважних фазових переходів, що викликані дією механічної напруги. Цей підхід заснований на теорії Ландау–Гінзбурга і орієнтований на моделювання фазових переходів в сталях і матеріалах з пам'яттю форми.

Від моделі вимагається не стільки адекватність в традиційному сенсі (як правило, недосяжна), скільки відтворення якісних особливостей поведінки спостережуваної системи. При цьому модель має бути якомога простішою і наочнішою. Крім того модельована система має бути градієнтною, тобто такою, в якій присутні нестаціонарні режими, що є перехідними до стаціонарних станів і розділяючі області, близькі до стаціонарних [39].

Розглянемо в зв'язку з цим метод [43], добре придатний для формалізованого опису критичних подій, заснований на моделюванні хаотичних режимів з сильними викидами, - так звана жорстка турбулентність, в частині опису фонової (міжпікової) динаміки і переходу від фонової динаміки до пікової в умовах неповноти інформації про спостережувану систему [39, 43].

Для дослідження подібних викидів використовується рівняння Гинзбурга–Ландау, яке є однією з основних математичних моделей, що займають особливе місце в нелінійній динаміці [47]. Дане рівняння демонструє велику різноманітність рішень, включаючи стаціонарні, періодичні і хаотичні, і використовується, зокрема, для опису явищ, що мають місце в нелінійних середовищах, – переходу до режимів із загостренням [39]:

$$\frac{da}{dt} = (1 + ic_1)\Delta a + (1 + ic_0)a - (1 + ic_2)|a|^2 a.$$
(2.29)

Тут a – деяка функція (амплітуда коливань) дійсних змінних, а c_0 , c_1 , c_2 – параметри (дійсні постійні). При певному співвідношенні значень параметрів в системі (2.29) можна спостерігати жорстку турбулентність [13, 39]– хаотичний режим з виключно сильними викидами (піками).

Задоволення позначеним вище вимогам градієнтності [39] встановлюється наступним [13]:

Перепишемо рівняння (2.29) в речовому вигляді

$$\frac{da}{dt} = \Delta a + a - \left|a\right|^2 a \,. \tag{2.30}$$

Для градієнтного рівняння можна ввести функціонал узагальненої вільної енергії (у математичній теорії стійкості він називається функціоналом Ляпунова) [58]. Функціонал Ляпунова для рівняння (2.30) має вигляд [13]:

$$F = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \left[-\left|a\right|^2 + \frac{1}{2}\left|a\right|^4 + \left|\nabla a\right|^2 \right] dx dy \equiv$$

$$\equiv \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \left[-a^* + \frac{1}{2}a^2a^{*2} + \left(\nabla a\nabla a^*\right)^2 \right] dx dy$$
(2.31)

Дотримуючись [13], проведемо варіацію комплексної функції *а* з «закріпленими краями»:

$$a = a_0 + \delta a, \quad \delta a \to 0 \quad npu \quad |x|, |y| \to \infty.$$
 (2.32)

Обчислюючи варіацію з обліком (2.32), отримаємо

$$\delta F = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial U}{\partial a} \delta a + \frac{\partial U}{\partial \nabla a} \delta (\nabla a) + \frac{\partial U}{\partial a^*} \delta a^* + \frac{\partial U}{\partial \nabla a^*} \delta (\nabla a^*) \right] dxdy$$
(2.33)

Доданки в підінтегральному виразі, що містять варіації похідних від *a*, перетворимо за допомогою інтеграції по частинах:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial U}{\partial \nabla a} \nabla (\delta a) \right] dx dy = \frac{\partial U}{\partial \nabla a} \delta a \Big|_{-\infty}^{+\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\nabla \cdot \frac{\partial U}{\partial \nabla a} \right] \delta a \, dx dy$$
(2.34)

Перший член в (2.34) обертається в нуль з урахуванням умови закріплених кінців (2.32). Після цього варіація функціоналу (2.33) набирає вигляду

$$\delta F = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \underbrace{\left[\frac{\partial U}{\partial a} - \nabla \left(\frac{\partial U}{\partial \nabla a} \right) \delta a \right]}_{\frac{\delta F}{\delta a}} + \underbrace{\left[\frac{\partial U}{\partial a^*} - \nabla \left(\frac{\partial U}{\partial \nabla a^*} \right) \delta a^* \right]}_{\frac{\delta F}{\delta a^*}} \right\} dxdy$$

$$(2.35)$$

Коефіцієнти при δa і δa^* в підінтегральному виразі (2.35) називаються функціональними похідними і позначаються як $\frac{\delta F}{\delta a}$ і $\frac{\delta F}{\delta a^*}$ (формула (2.35) дає правило обчислення варіаційної похідної [61].

З урахуванням (2.35) і (2.31) рівняння (2.30) можна представити в градієнтному вигляді

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\delta F}{\delta a^*}.$$
(2.36)

Градієнтні рівняння мають важливу властивість, що відноситься до поведінки функціонала Ляпунова в часі [43]. Диференціюючи ліву й праву частини (2.31) за часом і виконуючи інтеграцію по частинах (так само, як це робилося вище), отримаємо

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left[\frac{\partial U}{\partial a} - \nabla \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial \nabla a} \right) \right] \frac{\partial a}{\partial t} + \left[\frac{\partial U}{\partial a^*} - \nabla \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial \nabla a^*} \right) \right] \frac{\partial a^*}{\partial t} \right\} dx dy$$
(2.37)

Помічаючи, що під інтегралом в квадратних дужках стоїть варіаційна похідна [61] і, використовуючи (2.36), знаходимо

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\delta F}{\delta a} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\delta F}{\delta a^*} \frac{\partial a^*}{\partial t} \right\} dx dy = -\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial a}{\partial t} \right|^2 dx dy \le 0$$
(2.38)

Оскільки інтеграл в правій частині рівняння (2.38) є негативною величиною або нулем, функціонал Ляпунова безперервно убуває до тих пір, поки не досягне свого мінімального значення. При цьому $\frac{\partial a}{\partial t} = 0$, тобто реалізується одне із стаціонарних вирішень рівняння (2.30). За шумових початкових умов найбільш вірогідним є досягнення стаціонарного рішення з найменшим значенням функціонала Ляпунова [13].

Таким чином, в градієнтних системах завжди встановлюється один із стаціонарних станів. Нестаціонарні режими є перехідними і зазвичай містять рухомі фронти, що розділяють області структур поля, близьких до стаціонарних [69, 70].

Наступною важливою властивістю рівняння (2.29) є існування ряду законів збереження [39]. Це закон збереження «маси», «імпульсу» і «енергії»:

-
$$M = \int |a|^2 dx$$
,
- $P = \frac{1}{2i} \int \left(a^* a_x - aa_x^*\right) dx$,
- $E = \int \left(\left|a_x\right|^2 - \frac{1}{3}|a|^6\right) dx$.

Найбільш важливим тут аспектом з погляду аналізу процесу накопичення пошкоджуваності є не стільки самий математичний опис, а факт розуміння механізмів загострення режимів і виявлення параметрів, що сигналізують про попадання в небезпечну область.

У чисельних експериментах [39] «життєвий цикл» одиночного піку виглядає таким чином (рис. 2.10). Спочатку в системі спостерігаються повільні нерегулярні просторово-часові коливання. У кожен момент часу графік a(x) виглядає гладким. Потім, в якийсь момент часу починається зростання піку. Швидкість росту значно перевищує характерну величину a(x) поза областю піку. Далі, після того, як пік досягає максимальної величини, починається його розпад. Розпад піку продовжується його перетворенням на швидко осцилюючий хвильовий пакет з колоколообразною огинаючою.



Рис. 2.10. Профілі дійсної і уявної частин w в різні характерні моменти розвитку і розпаду піку

В ході еволюції піку маса, імпульс і енергія поводяться таким чином [39]. На початку викиду відбувається сплеск енергії – практично миттєве зростання на декілька порядків. Потім, в ході розпаду піку і далі, енергія поволі і монотонно убуває. Маса міняється значно слабкіше, ніж енергія. Імпульс практично не відображає розвиток піку: у розрахунках, де його початкове значення близьке до нуля, його подальша зміна незначна (рис. 2.11)



Рис. 2.11. Зміна маси і енергії на разных тимчасових масштабах

Зміна параметра M може служити передвісником зростання піків [39]. Вона показує наскільки небезпечне те положення, в якому знаходиться система.

Стосовно побудови системи контролю за станом об'єкту експлуатації цей результат висуває мінімальні вимоги до системи моніторингу, які зводяться до того, що вона повинна визначати вірогідність того, що при спостережуваних значеннях параметрів почнеться зростання обурень в системі. В даний час не відомі прості способи точного прогнозу моменту і координати початку наступного піку, а також його висоти. В зв'язку з цим представляється природною спроба доповнити динамічний опис системи статистичним, виходячи із співвідношення перших двох моментів розподілу випадкової величини [61], що показує, подій якого масштабу слід чекати від системи. Для цього користуватимемося введеним раніше параметром пошкоджуваності, основним нововведенням якого є додання при аналізі тимчасової еволюції системи інформаційної значущості чиннику нерегулярності, або ступеню варіації поведінки динамічних змінних, що генеруються системою.

З'ясуванню цього і інших питань в плані вирішення проблеми буде присвячений наступний підрозділ. Але раніше необхідним є ряд додаткових досліджень.

До цих пір ми не враховували вплив внутрішньої динаміки системи, фактично нехтуючи обміном енергією між часточками, блукаючими по фрактальній множині і флуктуаціями поля, що розсіюють енергію. Поступаючи таким чином, ми свідомо відклали дослідження механізмів, що відображають істотно нерівноважну природу критичного стану середовища в режимі ризику, до тієї стадії, поки нас не зацікавить питання про те, яким чином можна припустити зв'язок отриманих результатів з дослідженнями, що вивчають фундаментальні процеси, що лежать в основі нелінійної динаміки, і що відображають нові парадигми сучасної теорії нерівноважної термодинаміки [56, 64].

Не претендуючи на математичну строгість і торкаючись лише практичної сторони питання, позначимо лише, яким чином можна припустити існуючий зв'язок.

2.3. Просторово-часова топологія процесу накопичення пошкоджуваності

Основне спрощення, як було показано в попередньому розділі, є наслідком розуміння того, що хаотичний рух виникає з регулярного із-за нелінійних процесів, що приводять до розвитку нестійкостей, що породжають стохастичну динаміку [6, 32, 71].

Розуміння механізмів накопичення пошкоджуваності у зв'язку з умовами появи хаосу в регулярних рівняннях руху допомагає наблизитися до створення методу контролю стану системи. Ця можливість пов'язана із строго сформульованими на сьогодні ознаками переходу регулярність – хаос, головною з яких є локальна нестійкість і дивний аттрактор [3, 8, 31, 34, 36, 71].

2.3.1. Формування часової топології

Специфіка нерівноважних середовищ полягає в тому, що топологічні дефекти поля безперервно рухаються, народжуються і вмирають, тобто виникнення хаосу можна розглядати як наслідок флуктуацій дефектів, що відображає внутрішню еволюцію системи [10]. Простежимо за структурними перетвореннями в системі, моделюючи динаміку накопичення пошкодженості в системі фрактальним броунівським процесом [60].

Перш ніж перейти до фрактального броунівського руху, обговоримо властивості віннеровського процесу [24].

До моделі віннеровського процесу приходимо на підставі наступних міркувань [24].

Часточки середовища у відсутність зовнішніх дій знаходяться в постійному русі. Віннеровський процес B(t) за визначенням знаходиться через білий шум n(t) із стохастичного диференційного рівняння $\frac{dB(t)}{dt} = n(t), B(t_0) = B_0 = 0$ або

$$B(t) = \int_{t_0}^t dB(t) = \int_{t_0}^t n(t) dt \,. \tag{2.39}$$

Математичне очікування і кореляційна функція стаціонарного білого шуму Гауса відповідно рівні:

$$M\{n(t)\} = 0 (2.40)$$

$$K_{2n}(t_1, t_2) = M\{n(t_1), n(t_2)\} = N_0 \delta(t_2 - t_1), \quad (2.41)$$

де N_0 – спектральна щільність білого шуму; $\delta(t_2 - t_1)$ – дельта-функція.

Віннерівський процес після лінійного перетворення (2.39) залишається процесом Гауса і з урахуванням (2.40) і (2.41) має при $B(t_0) = B_0 = 0$ відповідно математичне очікування, дисперсію і кореляційну функцію:

$$M\{B(t)\} = \int_{t_0}^t M\{n(\tau)\}d\tau = 0, \qquad (2.42)$$

$$M\{B^{2}(t)\} = \int_{t_{0}t_{0}}^{t} \int_{0}^{t} M\{n(\tau_{1})n(\tau_{2})d\tau_{1}d\tau_{2} = N_{0}t, \quad t > 0, (2.43)$$

$$k_{2B}(t_{1},t_{2}) = \int_{t_{0}t_{0}}^{t_{2}t_{1}} M\{n(\tau_{1})n(\tau_{2})\}d\tau_{1}d\tau_{2} = \begin{cases} N_{0}t_{1}, \quad t_{1} \leq t_{2} \\ N_{0}t_{2}, \quad t_{2} < t_{1} \end{cases} = N_{0}\min(t_{1},t_{2}), \quad t_{1} > 0, \quad t_{2} > 0$$

$$(2.44)$$

Очевидно, кореляційну функцію віннеровського процесу можна також представити для позитивних t_1 і t_2 у вигляді

$$k_{2B}(t_1, t_2) = \frac{N_0}{2}(t_1 + t_2 - |t_2 - t_1|).$$
(2.45)

Щільність розподілу виннеровского процесу має вигляд

$$p(B(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0 t}} \exp\left\{-\frac{B^2(t)}{2D}\right\}, \quad t > 0.$$
 (2.46)

Розглянемо деякі властивості приростів віннеровського процесу: їх некорельованість на інтервалах часу, що не перекриваються, і самоподібність.

Для моментів часу $t_2 > t_1 > t_0 > 0$ маємо

$$B(t_1) - B(t_0) = \int_{t_0}^{t_1} n(\tau) d\tau$$

Звідси на підставі (2.42) і (2.43) математичне очікування і дисперсія приросту віннерівського процесу відповідно рівні:

$$M\{B(t_1) - B(t_0)\} = 0,$$

$$M\{(B(t_1) - B(t_0))^2\} = N_0(t_1 - t_0) \sim t_1 - t_0. \quad (2.47)$$

Взаємна кореляційна функція приростів при виконанні умови (2.47) на підставі (2.44) рівна

$$M \{ [B(t_2) - B(t_1)] [B(t_1) - B(t_0)] \} = k(t_1, t_2) - k_2(t_2, t_0) + k_2(t_1, t_0) = N_0 t_1 - N_0 t_1 - N_0 t_0 + N_0 t_0$$

Таким чином, прирости процесу B(t) не корельовані і, оскільки мають розподіл Гауса, вони також незалежні.

Перейдемо до розгляду властивостей самоподібності. Нам це необхідно, оскільки ми моделюємо механізм з ієрархічною організацією алгоритму протікання процесу.

Щільність розподілу приростів вінерівського процесу при $B(t_0) \neq 0$ має вигляд

$$p[(B(t) - B(t_0)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0(t - t_0)}} exp\left\{-\frac{[B(t) - B(t_0)]^2}{2N_0(t - t_0)}\right\}, \quad t > 0$$
(2.48)

Змінимо масштаб часу в b раз. З огляду на те, що дисперсія процесу також збільшується в b раз – $N_0b(t-t_0)$, для забезпечення нормування щільності розподілу на одиницю необхідно збільшити приріст віннерівського процесу в $b^{1/2}$ раз, тобто змінити масштаб координати в таке ж число разів $b^{1/2}$.

$$p[b^{1/2} \{B(bt) - B(bt_0)\}] = \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0 b(t - t_0)}} \exp\left\{-\frac{\{b^{1/2} [B(bt) - B(bt_0)]^2\}}{2N_0 b(t - t_0)}\right\}, \quad t > 0$$
(2.49)

Очевидно, що щільність (2.48) і (2.49) зв'язані співвідношенням

$$b^{1/2} p[b^{1/2} \{ B(bt) - B(bt_0) \}] = p[B(t) - B(t_0)],$$

що виражає умову самоподібності: щільність вірогідності відмасштабованого віннерівського процесу, помножена на коефіцієнт $b^{1/2}$, не залежить від вибраного масштабу часу. Як випливає з отриманого результату, зміна масштабу часу в b раз супроводиться зміною масштабу приросту координати віннерівського процесу в $b^{1/2}$ раз і властивість самоподібності можна записати також у формі:

$$b^{-1/2}[B(bt) - B(bt_0)] = B(t) - B(t_0).$$

Для опису явищ, що володіють фрактальними властивостями, в роботі [28] було введено узагальнений броунівський рух, який, за визначенням, записується у формі дробового інтеграла

$$B_H(t) = \frac{1}{\Gamma\left(H + \frac{l}{2}\right)} \int_{-\infty}^{e} h(t - \tau) dB(\tau)$$
 (2.50)

де $dB(\tau)$ – приріст віннерівського процесу; $\Gamma\left(H+\frac{1}{2}\right)$ – гамма-функція;

Н – параметр Херста.

Імпульсна перехідна функція рівна

$$h(t-\tau) = \begin{cases} (t-\tau)^{H-1/2}, & 0 \le \tau \le t; \\ (t-\tau)^{H-1/2} - (-\tau)^{H-1/2}, & \tau < 0. \end{cases}$$
(2.51)

Використання у формулі (2.50) імпульсної перехідної функції статечного вигляду (2.51) приводить до сильної корельованої залежності процесу $B_H(t)$ від попередніх його значень, а також указує на самоподібний характер фрактального броунівського руху. На підставі співвідношення $h(bt - b\tau) = b^{H-1/2}h(t - \tau)$, а також залежності для віннерівського процесу $dB(b\tau) = b^{1/2}dB(\tau)$ з формули (2.50) отримуємо $B_H(bt) = b^H B_H(t)$

$$B_H(t) = b^{-H} B_H(bt),$$
 (2.52)

що підтверджує самоподібний характер фрактального броунівського руху. Для приростів цього процесу математичне очікування і дисперсія на підставі (2.50) з урахуванням властивостей віннерівського процесу $M\{dB(T)\} = 0, M\{dB(\tau_1)dB(\tau_2)\} = M\{n\tau_1)n(\tau_2)\}d\tau_1d\tau_2 =$ $= N_0 \delta(\tau_2 - \tau_1) d\tau_1 d\tau_2$ відповідно рівні

$$M\{B_{H}(t) - B_{H}(t_{0})\} = 0; \qquad (2.53)$$

$$M\{[B_H(t) - B_H(t_0)]^2\} \sim (t - t_0)^{2H}.$$
 (2.54)

Відзначимо також, що як для класичного, так і для фрактального броунівського руху дисперсії приростів ростуть із збільшенням різниці $t - t_0$ [24].

Визначимо нормовану кореляційну функцію (коефіцієнт кореляції) стаціонарних приростів фрактального броунівського руху для двох сусідніх, що не перекриваються, знаковій тривалості інтервалів часу (t_0, t_1) і (t_1, t_2) [24]:

$$r_{H}(t) = \frac{M\{[B_{H}(t_{1}) - B_{H}(t_{0})][B_{H}(t_{2}) - B_{H}(t_{1})]\}}{M\{[B_{H}(t_{1}) - B_{H}(t_{0})]^{2}\}};$$

або при $B_{H}(t_{0}) = 0$

$$r_H(t) = \frac{M\{B_H(t) - B_H(2t)\} - M\{B_H^2(t)\}}{M\{B_H^2(t)\}}.$$
 (2.55)

Додаючи і віднімаючи в кожному із співмножників першого доданку (2.55) відповідно B(2t) і B(t), після перемножування і приведення подібних членів отримуємо

$$r_{H}(t) = \frac{M\{[B_{H}(t) - B_{H}(2t) + B_{H}(2t)][B_{H}(2t) - B_{H}(t) + B_{H}(t)]\}}{M\{B_{H}^{2}(t)\}} - 1 = \frac{M\{B_{H}^{2}(2t)\}}{M\{B_{H}^{2}(t)\}} - \left[\frac{M\{B_{H}(t)B_{H}(2t)\}}{M\{B_{H}^{2}(t)\}} - 1\right] - 2.$$
(2.56)

Зважаючи, що співвідношення в квадратних дужках у виразі (2.56) на основі (2.55) рівного $r_{H}(t)$, а також враховуючи (2.54), маємо остаточно

$$r_H(t) = 2^{2H-1} - 1 \tag{2.57}$$

Якщо (2.57) множити на $M\{B_{H}^{2}(t)\} \sim t^{2H}$, то приходимо до кореляційної функції приростів на інтервалах (0, t) і (t, 2t) фрактального броунівського руху [54]

$$K_{2H}(t) \approx (2^{2H-1}-1)t^{2H}$$

Цей вираз указує на сильну кореляційну залежність приростів, що збільшується із зростанням *t*.

Відмітимо, що при H = 1/2 процес (2.50) стає віннерівським (2.39) з дисперсією і кореляційною функцією приростів, рівними відповідно (2.47) і нулю [18]. Використовуючи аналогічний підхід, можна від характеристик віннерівського процесу перейти до характеристик фрактального броунівського руху [18]. Наприклад, знання кореляційної функції (2.45) дозволяє записати кореляційну функцію фрактального броунівського руху у формі

$$K_{2H}(t_1, t_2) \sim 1/2[(t_1^{2H} + t_2^{2H} - |t_1 - t_2|^{2H}].$$
 (2.58)

Коефіцієнт кореляції для стаціонарних приростів фрактального броунівського руху на інтервалах $(t_n, t_n - T)$ і $(t_{n+k}, t_{n+k} - T)$ заданої тривалості T, розносяться на якийсь час kT, де k – параметр зсуву, можна представити, як і для рахункових характеристик, виразом

$$r_H(k,T) \sim \frac{1}{2} \Big[(k+1)^{\alpha+1} - 2k^{\alpha+1} + (k-1)^{\alpha+1} \Big].$$

При k = 1, що відповідає кореляційній залежності для приростів процесу на сусідніх інтервалах часу, а також враховуючи співвідношення $\alpha = 2H - 1$, отримуємо (2.57). При великих значеннях k коефіцієнт кореляції апроксимується виразом

$$r_H(k,T) \sim \frac{1}{2} \alpha (\alpha + 1) k^{\alpha - 1} = H(2H - 1) k^{2H - 2}.$$
 (2.59)

З цього виразу виходить, що чим більше параметр H, тим більше протяжною залежністю володіє $r_H(k, T)$. Цей висновок ми використовуємо нижче для характеристики поведінки тимчасової послідовності

емісійних сигналів через володіючі властивостями самоподібності статистики фрактального броунівського руху.

Якщо позначити прирости фрактального броунівського руху на інтервалах $(t_n, t_n - T)$ через X_n , то агрегований процес накопичення пошкоджуваності, сформований як послідовність середньозважених величин з приростів на *m* однакових інтервалах, що не перекриваються, тривалістю *T*, описується співвідношенням [24]

$$X^{(m)} = \{X_k^{(m)}; k = 0, 1, \mathsf{K}\} = \\ = \left\{\frac{X_1 + \mathsf{L} + X_m}{m}, \mathsf{K}, \frac{X_{km+1} + \mathsf{L} + X_{(k+1)m}}{m}\right\}$$

У агрегованого процесу приростів, як і для рахункових характеристик, при $m \to \infty$ коефіцієнт кореляції $r_H(k, T)$ зберігає свою структуру і практично не залежить від параметра m, а дисперсія змінюється згідно співвідношенню

$$D^{(m)}(t) \sim m^{\alpha - l} \tag{2.60}$$

Для короткопротяжних залежностей дисперсія приростів агрегованого процесу змінюється як $D^{(m)}(t) \sim m^{-1}$ [64].

Вказана статистика – дисперсія приростів є зручною для фрактальних властивостей характеристикою при обробці експериментальних даних по методу аналізу кумулятивного процесу пошкоджуваності, що розробляється.

2.3.2. Формування просторової топології

Розглянемо тепер просторову топологію процесу пошкоджуваності системи як ієрархічного процесу.

Згідно гіпотезі універсальної подібності Уїдома-Каданова [33] поблизу критичної точки всю систему можна розбити на окремі блоки і вважати, що кореляції часток усередині блоку приблизно такі ж як і між блоками.

Формальне завдання знаходження щільності вірогідності $p_N(R,T)$ того, що часточка, випробувавши N стрибків, опиниться від місця старту на відстані від R до $R + \Delta R$ в певний момент часу [18],

для даного процесу накопичення пошкоджуваності в системі має прямий сенс. Тут досліджувана випадкова величина реалізується, коли підпорядкована випадкова величина набуває деякого певного значення, тобто топологічно це виглядає, як випадкові блукання в просторах нецілої розмірності (фрактальних просторах) [54], тобто характер випадкових блукань (стрибків) має особливості, як з'ясовано вище, що полягають в тому, що має місце субординація випадкових процесів [53].

Представимо досліджуваний процес моделлю випадкового процесу з приростами випадкової величини [18].

Якщо $p_x(x,T)$ — умовна вірогідність відбутися події x, якщо відбулася подія T, а щільність розподілу цієї події є $p_T(T,t)$, тоді безумовна вірогідність знайти випадкову величину в стані x рівна

$$p(x) = \int_{0}^{\infty} p(x,T) p_{T}(T,t) dt.$$
 (2.61)

Має сенс розглядати у якості функції розподілу класичних гаусових випадкових блукань, де дійсний час t замінений на умовний час T. Останнє має місце, наприклад, для броунівської дифузії, якщо часточка піддається ударам не рівномірно за часом, а через випадкові тимчасові проміжки, функція розподілу яких і є $p_T(T,t)$, або дифузія відбувається на фракталах.

Наша мета - отримати функцію для безумовного розподілу випадкових блукань радіус вектора $R = \sum_{i=1}^{N} r_i$ при умовній вірогідності розподілу Гауса $p_x(x,T)$, тобто знайти функцію $p_T(T,t)$. Рішення цієї задачі формулюється в узагальнених двохпараметричних функціях Леві [18]:

$$L(x;\alpha,\gamma) = \frac{1}{\pi} Re \int_{0}^{\infty} exp\left[-ixz - z^{\alpha} exp\left(\frac{i\pi\gamma}{2}\right)\right] dz \quad (2.62)$$

Шукатимемо розподіл випадкової величини в наступному класі функцій [18]:

$$\varphi(0) = \frac{q}{r_N^{\alpha}} - \frac{q}{r_l^{\alpha}}, \qquad (2.63)$$

якщо радіус-вектор r випадково переміщається з положення I в положення N після N-го стрибка. Тут q — деякий «заряд», який у всіх часточок вважатимемо за однаковий (у (2.63) це просто коефіцієнт пропорційності), а показник ступеня α визначимо пізніше.

Введемо той же скаляр $\varphi(0)$ по декілька зміненій формулі [18]:

$$\varphi(0) = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{q}{r_N^{\alpha}} - \frac{q}{r_l^{\alpha}} = \sum_{i=2}^{N} \frac{q}{r_i^{\alpha}} - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{q}{r_i^{\alpha}}$$
(2.64)

У цей вираз входить сума двох випадкових величин, де просто перегруповані доданки. Якщо кожне з них має функцію розподілу Леві, то сума (різниця) випадкових величин через стійкість також має функцію розподілу Леві [61].

За визначенням щільність вірогідності розподілу $\varphi(0)$ рівна

$$\varphi(0) = \int \delta(\varphi - \varphi(0)) P_N(r_1 \dots r_N) dr_1 \dots dr_N,$$

де $\delta(x)$ - дельта-функція, а $P_N(r_1 \dots r_N)$ - вірогідність знайти часточку після першого стрибка в точці r_1 , після другого – в крапці r_2 і так далі. Введемо Фурье-образ дельта-функції [18], тоді

$$W(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dK \int_{V} \dots \int_{V} P_N(r_1 \dots r_N) dr_1 \dots dr_N \exp\left[iK\left(\varphi - \sum_{i=1}^{N} \frac{q}{r_i^{\alpha}}\right)\right].$$
(2.65)

Хай будь-який стрибок може бути проведений в будь-яку точку простору рівноімовірно, тоді

$$P_N(r_1...r_N) = \frac{l}{V^N}$$
(2.66)

Тепер щільність вірогідності (2.66) зручно представити у вигляді

$$W(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dK \exp(iK\varphi) \prod_{i=1}^{N} \left\{ l - \frac{1}{V} \int_{V} \left[l - \exp\left(iK\frac{q}{r_{i}^{\alpha}}\right) \right] dr_{i} \right\},$$
(2.67)

і завдання зводиться до знаходження єдиного інтеграла [18]

$$I_{\alpha,G} = \frac{1}{V} \int_{V} \left[1 - \exp\left(-iK\frac{q}{r^{\alpha}}\right) \right] dr \cong \frac{d(Kq)^{G_{\alpha}}}{V} \int_{0}^{\infty} (1 - \cos y) \frac{dy}{y^{G_{\alpha+1}}}$$
(2.68)

Тут α - показник ступеня в законі (2.63), G - кількість просторових вимірювань, d - результат інтеграції по кутах.

Інтеграл (2.68) сходиться, якщо $0 \le \frac{G}{\alpha} \le 2$, тобто у вікні визначення розподілу Леві [61]. Інтеграл в правій частині (2.68) обчислюється по частинах:

$$I_{\alpha,G} = \frac{\pi d(Kq)^{G_{\alpha}}}{2GV \sin\left(\frac{\pi G}{2\alpha}\right)} \Gamma\left(\frac{G}{\alpha}\right) = BK^{G_{\alpha}},$$

де В - константа, $\Gamma(x)$ - гамма-функція Ейлера.

У (2.67) всі інтеграли однакові, тому можна перейти до експоненціальної межі при $N \to \infty$:

$$(1 - I_{\alpha,G})^N = (1 - \frac{NBK^{G_{\alpha}}}{N})^N \rightarrow exp(-NBK^{G_{\alpha}}).$$

Відповідно до [18], вважаючи, що скачки відбуваються рівномірно, тобто з постійною швидкістю $N = \gamma T$, вводимо позначення

$$\varphi(0) = B^{\mathscr{H}_G} = \frac{q}{V^{\mathscr{H}_G}} \left[\frac{\pi d}{2D\sin(\frac{\pi G}{2\alpha})\Gamma(G/\alpha)}\right]^{\mathscr{H}_G},$$
$$x = K\varphi_0, \beta = \varphi/\varphi_0.$$

В результаті з (2.67) слідує вираз для щільності розподілу вірогідності випадкової величини $\varphi(0)$ (2.63) у вигляді залежного від часу розподілу Леві

$$W(\beta) = \pi^{-I} \int_{0}^{\infty} \cos(\beta x) \exp(-\gamma t x^{G/\alpha}) dx$$

Викладені результати є відомими [18] (ми привели лише їх спрощене трактування, що демонструє кінцевий результат) - проста схема випадкових блукань скаляра, функціонально пов'язаного з радіусвектором, дає вірогідність розподілу випадкових блукань Леві.

Закон розподілу блукань Леві характерний поволі спадаючою асимптотикою, тобто значною кількістю великих флуктуацій [75].

Чисельне моделювання процесу за допомогою стрибків Леві [54] показало, що відвідані під час дифузії точки об'єднуються в кластери, добре розділені в просторі. При докладнішому розгляді виявляється, що кожен з кластерів, у свою чергу, складається з сукупності кластерів. Таким чином, утворюється ієрархічна структура з самоподібних кластерів [6]. Особливістю стрибків Леві є можливість часточки на кожному кроці зміщуватися на скільки завгодно великі відстані [39], так що середньоквадратичний зсув за одиничний проміжок часу виявляється нескінченним, а функція розподілу вірогідності у Фурье-уявленні має вигляд [60]

$$P(k,t) = exp(-A|k|^{D}t),$$
 (2.69)

де A і D –позитивні величини 1 < D < 2.

Звернемося до польового трактування, розвиненого в попередньому розділі, і введемо в завдання про дифузію поля [60].

Це пов'язано з двоякою роллю поля в завданні про дифузію, що співвідноситься з двоякою роллю вихрового деформаційного поля в концепції мезомеханіки [41]. З одного боку воно індуцює дрейф у напрямі поля, з іншого, - породжує захоплення енергії [60]. Ними є «безвихідь» на остові перколяційного кластера. Згідно роботам [5, 51], кон-

куренція вказаних ефектів може привести до немонотонної залежності швидкості від поля. До аналізу цього ефекту ми звернемося пізніше, маючи на увазі отриману раніше немонотонну залежність варіації визначальної ознаки від масштабного чинника пошкоджуваності в алгоритмі фрактальної схеми напрацювання на відмову.

А зараз розглянемо просторову ілюстрацію стрибків Леві [73].

Для ілюстрації якісного опису картини утворення фрактальної топології процесу накопичення повреждаемости перейдемо знову від дискретного опису до безперервного в рамках турбулентної феноменології. Реальна просторова структура описується в рамках вирішення рівняння Навье-Стокса

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v\nabla)v = -\nabla(P/\rho) + v\nabla^2 v + F$$

відоме як ABC-течія, і що грає важливу роль у формуванні сучасних поглядів на зародження турбулентності [13, 58].

На рис. 2.12 представлена поведінка ліній струму АВС-систем.

Стохастична динаміка ліній струму виявляється у виникненні в просторі інваріантних поверхонь (трубок струму), орієнтованих в просторі в декількох напрямах, перетини яких утворюють вікна в стохастичній структурі ліній струму (рис.2.13). Решта всієї області є фрактальною множиною.

Фігури, що утворюються при цьому, є типовими фракталами. Дія різних сил в рівняннях руху приводить до своєрідної кластеризації дифузії, і простір виявляється кластеризованим, тобто поділено на фрактальні області. Таким чином, ми маємо справу не з реакціями на аддитивні обурення в середовищі, а з складною багатомасштабною нелінійною системою. При цьому відбувається перебудова структур. Спостерігається поява великих кореляцій і утворення когерентних структур у вигляді струменів, що забезпечують перенесення енергії [62].

Лінія струму по випадковому закону вибирає напрям свого подальшого руху. В результаті виникає просторовий дифузійний процес, що аналогічно фрактальному процесу розповсюдження обурення в дискретному випадку дифузії дефектів, що підкоряється статистиці Леві.



Рис. 2.12. Візуалізація шляхів ліній АВС-течії в послідовні інтервали часу і в проекції на координатну площину [73]

Не вдаючись до математичних викладень, викладених в обширних дослідженнях [10, 13, 23, 31, 36, 53, 58], обмежимося важливим виводом, що встановлює універсальність прояву таких фізичних об'єктів, що розрізняються, як фазовий портрет динамічної системи у фазовому просторі і геометрична структура течій в координатному просторі, що відображають таку відмітну властивість хаотичних систем, як перемежаємість. Воно полягає в тому, що траєкторії системи можуть бути реалізацією випадкових тимчасових процесів, хоча ніяких випадкових джерел в рівняннях немає [17]. Локальне порушення стійкості в елементах структури системи, що викликають перемежованість, не описується класичним (нормальним) законом дисперсії [54]. З найзагальніших теоретичних уявлень виходить, що динаміка такого процесу може описуватися статечними законами розподілу, багатомасштабністю, тобто спектром характерних масштабів. Дальні кореляції, що формуються властивістю багатомасштабної інваріантності і негаусовою статистикою, викликають підвищене турбулентне перенесення - аномальну дифузію [18, 54].



Рис. 2.13. Перетин Пуанкаре ліній струму АВС-течії при z=0 [73]

Існування подібного зв'язку є дуже ефективним і дає можливість глибше проникнути в природу пошкоджуваності системи і дозволяє застосувати методи нелінійної динаміки з можливістю включення в процес дослідження принципово нового елементу, яким є хаос.

Розглянемо, дотримуючись [59] одновимірний дискретний аналог стрибків Леві на фрактальних решітках, що моделюються остовом використовуваної в теорії перколяції фрактала Мальдерброта-Гівена [28]. Позначимо вірогідність часточки опинитися на l вузлі після n кроків $P_n(l)$ і розподіл вірогідності стрибків по довжинах f(l):

$$P_{n+1}(l) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(l-m) P_n(m)$$
 (2.70)

У якості функції f(l) виберемо наступну функцію:

$$f(l) = \sum_{n=0}^{\infty} a^{-n} (\delta_{l,-b^n} + \delta_{l,b^n}), \qquad (2.71)$$

де $\delta_{n,m}$ - символ Кронекера. Тоді структурна функція для такого випадкового блукання рівна

$$\lambda = \int f(l) \exp(ikl) dl = \sum_{n=0}^{\infty} a^{-n} \cos(kb^n).$$
 (2.72)

Відмітимо також, що структурна функція λ задовольняє функціональному рівнянню

$$\lambda(k) = a\lambda(kb).$$

Отже, при $k \to 0$ вона повинна поводитися статечним чином з показником $D = \ln a / \ln b$. Оскільки на кожному кроці дифундуюча часточка покидає вузол, остільки сума вірогідності руху по W_+ і проти W_- поля, повинна дорівнювати одиниці: $W_+ + W_- = 1$. Звідси вираз для вірогідності руху по і проти поля:

$$W_{\pm} = (1 \pm \alpha)^{b^{n}} / \left[(1 + \alpha)^{b^{n}} + (1 - \alpha)^{b^{n}} \right].$$

Отже, структурна функція $\lambda(k; E)$ при дифузії за допомогою стрибків Леві в деформаційному полі дорівнює

$$\lambda(k; E) = \sum_{n=0}^{\infty} a^{-n} \Big[\cos(kb^n) + i\sin(kb^n)(W_+ - W_-) \Big]. \quad (2.73)$$

Як і при звичайній дифузії, другий доданок при малих $k \to 0$ містить дрейфову швидкість:

$$V = i\partial\lambda(k; RE) / \partial t \Big|_{k \to 0} = \sum_{n=0}^{\infty} (b/a)^n \times \\ \times \left\{ (1+\alpha)^{b^n} - (1-\alpha)^{b^n} \right\} / \left[(1+\alpha)^{b^n} + (1-\alpha)^{b^n} \right] \cong \sum_{n=0}^{\infty} (b/a)^n th(ab^n),$$
(2.74)
де th(y) - гіперболічний тангенс. Для обчислення швидкості скористаємося формулою Пуассона:

$$\sum_{n=0}^{\infty} f(n) = 1/2f(0) + \int_{0}^{\infty} f(t)dt + 2\sum_{m=1}^{\infty} f(t)\cos(2mt).$$

У нашому випадку $f(t) = (b/a)^{t} th(ab^{t})$. Зробивши дві заміни $t' = t \ln b$ і $z = \exp t'$, отримаємо для функції f(z):

$$f(z) = z^{-D} th(\alpha z)$$

Отже

$$V(E) = \alpha / 2 + \alpha^{(d-I)} \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{1}^{\infty} th(z) z^{-\gamma_m} dz + \int_{0}^{\alpha} th(z) z^{-\gamma_m} dz \right],$$

де показник $\gamma_m = D + 2\pi m i / \ln b$.

Неважко бачити, що другий доданок в дужках малий в порівнянні з першим за параметром α . Таким чином, отримуємо для швидкості нелінійну залежність (2.75):

$$V \sim R^{1-D} \tag{2.75}$$

Цей результат можна пояснити таким чином [60].

Введення фрактального ландшафту в завдання про дифузію сильно ускладнює проблему і це пов'язано з двоякою роллю фрактала як феноменологічного представлення провідних шляхів, за якими відбувається розповсюдження обурень, — він створює перешкоди дифузії дефектів у напрямі поля. Фрактальний ландшафт породжує тупикові ділянки на фрактальному остові, що обумовлюють опір розповсюдженню активності середовища, замикаючи (дисипіруя) енергію в цих тупікових гілках.

Конкуренція вказаних ефектів у фрактальній схемі накопичення пошкоджуваності приводить до немонотонної залежності параметра, що характеризує здатність середовища релаксувать обурення (опір протіканню) від потенціалу поля, що характеризується фрактальною розмірністю.

Порівнюючи (2.75) з виразом для фрактального алгоритму напрацювання на відмову і інтерпретуючи потенціал як величину пошкоджуваності в системі, швидкість дифузії величиною параметра попошкоджуваності, стає зрозумілим фізичний сенс введеної раніше характеристики.

2.3.3. Узгодження топології і кінетики процесу пошкодженості системи

Умова узгодження досягається в світлі теорії процесів перенесення [54], що співвідносить принципи дробової динаміки [7, 9].

Дотримуючись принципів дробової кінетики [9], розглянемо дробове рівняння перенесення:

$$\partial^{\alpha} \psi / \partial t^{\alpha} = \nabla_{\boldsymbol{r}}^{2\beta} (B\psi). \qquad (2.76)$$

Тут $\psi(t, \mathbf{r})$ - щільність вірогідності знайти часточку в точці \mathbf{r} у момент часу t, $\nabla_{\mathbf{r}}^{2\beta} \equiv \partial^{2\beta} / \partial \mathbf{r}^{2\beta}$ - оператор Лапласа, n – розмірність простору. Радіус-вектор пробігає точки, що лежать на перколюючій фрактальній множині. Рівняння (2.76) записане в дробових похідних як за часом t, так і по просторовій (фазовій) змінній \mathbf{r} . Введення дробових похідних $\partial^{\alpha} / \partial t^{\alpha}$ і $\partial^{2\beta} / \partial \mathbf{r}^{2\beta}$ в кінетичне рівняння (2.76) дозволяє врахувати ефекти пам'яті (α) і нелокальності (β) в контексті єдиного математичного формалізму [54].

Дробова похідна за часом $\partial^{\alpha} / \partial t^{\alpha}$ в лівій частині рівняння (2.76) виражається через оператора Рімана-Ліувілля [61], причому індекс α має сенс фрактальної розмірності активного часу і визначає перехід від випадкового броунівського блукання до випадкових блукань на фракталі [54].

$$\frac{\partial^{\alpha}}{\partial t^{\alpha}}\psi(t,\boldsymbol{r}) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \frac{\partial^{m}}{\partial t^{m}} \int_{0}^{t} \frac{\partial \vartheta}{(t-\vartheta)^{l+\alpha-m}} \psi(\vartheta,\boldsymbol{r}), \quad (2.77)$$

Розглянемо випадкове блукання часточки по самоподібній фрактальній множині, вкладеній в евклідовий простір E^n .

Припустимо, що часточка починає свій рух з початку координат r = 0 у момент часу t = 0. При k вимірюваннях (координатах)

вірогідність повернення часточки в початкову точку r = 0 після закінчення часу t > 0 дорівнює [58]

$$\Psi(t,0) \sim t^{-k/2}$$
 (2.78)

Відповідно число структурних елементів множини, які часточка встигне відвідати за час t > 0, складе по порядку величини

$$N(t) \sim \frac{1}{\psi(t,0)} \sim t^{k/2}$$
. (2.79)

Характерний розмір r(t) області, в якій побуває часточка до моменту часу t, легко оцінити із співвідношення для щільності фрактала Fв E^n :

$$N(t) \sim r^{n} \wp[F(r)] \sim [r(t)]^{D},$$

де *D* – фрактальна розмірність. Отже

$$r(t) \sim [N(t)]^{D^{-1}} \sim t^{k/2D}$$
. (2.80)

Дотримуючись роботи [54], спектральна фрактальна розмірність D_s фрактальної множини F є відношення хаусдорфової розмірності D до мінімальної хаусдорфовой розмірності D_{θ} шляхів, що сполучають образи точок $P_1 \in F$ і $P_2 \in F$, знаходяться в загальному положенні, при всіляких гомеоморфізмах $f: F \to F'$, що переводять фрактал F у фрактал F':

$$D_s \equiv \frac{D}{D_{\theta}} = \frac{2D}{2+\theta}.$$
(2.81)

Спектральна фрактальна розмірність D_s визначає міру фрактальної множини $F \subseteq E^n$ по відношенню до мінімальної міри шляхів, що дозволяють обійти внутрішні порожнечі в *F* і характеризує внутрішній устрій фрактальної множини.

Враховуючи, що розмірність k в (2.80) збігається з D_s , з (2.81) і (2.80) отримуємо

$$r(t) \sim t^{l/2+\theta}, \tag{2.82}$$

де θ має сенс індексу зв'язності фрактальної множини F і характеризує його топологію [54].

Середнєквадратичне видалення часточки від початку координат росте з *t* як

$$\left\langle r^{2}(t)\right\rangle = 2D \times t^{\mu}$$
, (2.83)

причому нормувальна постійна *D* має сенс узагальненого коефіцієнта перенесення, а показник ступеня при *t* дорівнює [62]

$$\mu = \frac{D_s}{D} = \frac{2}{2+\theta}$$
 (2.84)

Введення дробової похідної за часом $\partial^{\alpha} / \partial t^{\alpha}$ в кінетичне рівняння (2.76) дозволяє врахувати випадкові блукання у фрактальному часі часову складову динамічних процесів [62]. Процеси у фрактальному часі відповідають позитивному зворотньому зв'язку і відповідають супердифузійним процесам перенесення. Вони є істотно немарківськими процесами. Істотною особливістю супердифузійних процесів служить відсутність яких-небудь помітних стрибків в поведінці часточок; при цьому

середньоквадратичний зсув $\langle r^2(t) \rangle$ росте з t як t^{α} [54].

Порівнюючи (2.83) з (2.77), маємо $\mu = \alpha$. Параметр α має сенс фрактальної розмірності активного часу, в якому реальні блукання часточок виглядають як випадковий процес [62].

При цьому корелятор минулих і майбутніх приростів радіує вектора при випадкових блуканнях у фрактальному часі [47]:

$$Q \equiv \frac{\left\langle \delta \mathbf{r}(-t) \delta \mathbf{r}(t) \right\rangle}{\delta \mathbf{r}^{2}(t)} = 2^{\alpha - 1} \equiv const(t)$$
(2.85)

Постійність кореляційної функції свідчить про властивість персистентності - збереження тенденцій в поведінці тимчасового ряду [28], що представляє динамічні флуктуації величини $\mathbf{r}(t)$. Персистентні процеси у фрактальному часі є істотно немарківськими і відповідають позитивному зворотньому зв'язку і відповідають супердифузійним процесам перенесення в турбулентній області. Немарковість – тобто пам'ять системи про своє минуле [42] – виражається у присутності нелокального ядра $(t-9)^{-(1+\alpha-m)}$ в операторові Рімана-Ліувілля (2.77).

Перейдемо тепер, як показано в [62], аналізу просторової складової процесів перенесення, що відповідає операції $\nabla_{\mathbf{r}}^{2\beta}$, в кінетичному рівнянні (2.76). Розкладемо **r** по базису з декартових координат x_i . Маємо $\mathbf{r} = \mathbf{e}^i x_i$, де \mathbf{e}^i - одиничний вектор в напрямі i = 1, ..., n. Похідною $\partial^{\beta} / \partial x_i^{\beta}$ дробового порядку β є интегро-диференціальний оператор Рісса-Вейля, визначуваний згідно [61]

$$\frac{\partial^{\beta}}{\partial x_{i}^{\beta}}\psi(t,\boldsymbol{r}) = \frac{l}{\Gamma(l-\beta)} \frac{\partial}{\partial x_{i}} \int_{-\infty}^{x_{i}} \frac{\partial x_{i}'}{(x_{i}-x_{i}')^{\beta}} \psi(t,\boldsymbol{r}'). \quad (2.86)$$

Дробовий оператор Рісса-Вейля відповідає процесам Леві в просторі змінної r [44, 62].

Загальне вирішення дробового кінетичного рівняння було отримане в [54] для середньоквадратичного зсуву часточки від часу $\langle r^2(t) \rangle \sim t^{\mu}$, де $\mu = \alpha / \beta$. Звідси витікає, що значення показника μ для процесів перенесення на фрактальній множині визначається конкуренцією між СБФР (α) і процесами Леві (β). Відповідно з (2.84) витікає співвідношення пропорційності для кінетичного рівняння (2.76):

$$\mu = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{2}{2+\theta}.$$
 (2.89)

і характеризує складну просторово-часову структуру фазового портрета, обумовлену протистоянням випадкових блукань у фрактальному часі (α) і польотів Леві (β) [54].

Переваги, що віддаються тому або іншому НСС, доречно виразити через деякий параметр, що «розпізнає» різні НСС по характерних стати-

стичних ознаках, що відображають статистику динамічних флуктуацій в системі.

2.3.4. Прояви критичності стану структури системи

Прийняття нерегулярностей динамічних змінних у якості інформаційної основи методу дозволяє не тільки в найбільш загальній феноменологічній формі класифікувати всю інформацію, що міститься в хаотичних серіях, але й помітно витягувати необхідну її частину.

Вся "паспортна інформація", що виявляється в методі, природним чином формує єдиний інформаційний блок (сукупність параметрів, розмірних і безрозмірних), визначуваний як «інформація динамічних відмінностей". Відмітимо ще, що використовувана логіка введення параметра, що характеризує нерегулярності динамічних змінних, інформація про які може витягуватися на основі експериментальних вимірюваних хаотичних серій, і через це складає основу емпіричного знання про систему, повною мірою відповідає кінетичним закономірностям, розглянутим вище, регулюючим поведінку нелінійних динамічних систем [21]

Внутрішня динаміка нестаціонарної системи може бути записана у вигляді самоподібного тимчасового ряду, хаусдорфова розмірність якого [54]

$$D = l + S , \qquad (2.90)$$

де $0 \le S \le 1$, оскільки для безперервної самоподібної кривої $I_{S}(t)$ хаусдорфова розмірність $D\{I_{S}(t)\}$ поміщена в межах від 1 до 2.

Знаходячись в системі відліку НСС (d-интервалы), ряд $I_s(t)$ інтерпретується як динамічні флуктуації в хаотичному середовищі, обумовлені внутрішньою мінливістю НСС [54].

Значення хаусдорфовой розмірності $D\{I_{s}(t)\}$ визначає топологіч-

ну ентропію $\Xi\{I_{S}(t)\}=1-\frac{1}{D_{f}}$, що описує хаотичність динаміки без

припущення про закон вибору початкової точки [54]. Вона формалізує наступне нестроге поняття: для невідомої початкової точки, яку кількість інформації потрібно отримати з розрахунку на одну ітерацію, щоб передбачити велику кількість ітерацій з невеликою фіксованою помилкою [45].

Для самоподобных тимчасових рядів $I_s(t)$ дисперсія приростів у будь-який момент часу t має вигляд [61]:

$$\left\langle \left| I_{S}(t + \Delta t) - I_{S}(t) \right|^{2} \right\rangle = \Lambda_{J} \times \left| \Delta t \right|^{2J}$$
, (2.91)

де Λ_J - нормувальна постійна, операція усереднювання визначена згідно [54]

$$\left\langle \left| I_{S}(t+\Delta t) - I_{S}(t) \right|^{2} \right\rangle = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} \left[\left| I_{S}(t+\Delta t) - I_{S}(t) \right|^{2} \right] dt$$

а параметр Ј пов'язаний з Ѕ рівністю

$$J = l - S \,. \tag{2.92}$$

При J = I - S = I / 2 дисперсія (2.92) відповідає випадковим флуктуаціям в системі, вірогідність яких розподілена по Гаусу. Хаусдорфова рамерность D для гауссовых тимчасових рядів $I_{1/2}(t)$ дорівнює D = 2 - J = 2 - 1/2 = 3/2 [16].

Навпаки, при $J = 1 - S \neq 1/2$ статистика динамічних флуктуацій істотно не гауссова: сплески і падіння кривої $I_s(t)$ відбуваються не випадково, як в гауссовому проділі, а у відповідності з певними тенденціями [54], що закладені в значення параметра J = 1 - S. Дійсно, розглянемо корелятор $Q_J(t)$ минулих і майбутніх приростів самоподібного тимчасового ряду $I_s(t)$:

$$Q_J(t) = -\frac{\left\langle I_S(-t)I_S(t)\right\rangle}{\left\langle I_S^2(t)\right\rangle}.$$
(2.93)

Вважаючи $I_{s}(0) = 0$, з (2.93) отримаємо

$$Q_J(t) = 2^{2J-l} - l = const(t).$$
 (2.94)

Параметр 2*J* в (2.94) аналогічний фрактальній розмірності активного часу α в (2.85). Як видно з (2.94) величина $0 \le J \le 1$ визначає статистику флуктуацій, пов'язаних із станом системи (відношенням системи до власних флуктуацій). Для гаусовых флуктуацій J = 1/2 корелятор $Q_J(t) = 0$ - сплески і падіння тимчасового ряду $I_s(t)$ абсолютно

випадкові. При $0 \le J < 1/2$ корелятор $Q_J(t) < 0$ - сплеск функції $I_S(t)$ у минулому означає швидке падіння в майбутньому. Навпаки, при $1/2 < J \le 1$ корелятор $Q_J(t) > 0$ - сплеск у минулому означає зростання $I_S(t)$ в майбутньому. Дана обставина дозволяє говорити про збереження тенденцій в поведінці ряду $I_S(t)$, або про властивість персистентності.

Насправді, переваги, що віддаються тому або іншому НСС, доречно виразити через деякий параметр, що «розпізнає» різні НСС за характерними статистичними ознаками, що відображають статистику динамічних флуктуацій в системі [21].

Як було показано, у якості такого параметру зручно узяти параметр попошкоджуваності, як характеристики масштабу очікуваної події

$$V \sim R^{I-D} \,. \tag{2.95}$$

Позначимо параметр пошкоджуваності через

$$l - D = -\Theta. \tag{2.96}$$

Порівнюючи (2.90) і (2.92), маємо

$$\Theta = l - J \tag{2.97}$$

і, таким чином, показник ступеня в (2.95) пов'язаний з фундаментальними процесами, що лежать в основі нелінійної динаміки НСС.

У контексті фрактальних узагальнень [54] випадкового броунівського руху [28] показник J називають показником Херста H, пов'язаний з параметром μ в (2.89) співвідношенням

$$\mu = 2H . \tag{2.98}$$

Фрактальна розмірність траєкторій часточок в області НСС [28] визначається через цей показник таким чином

$$D = 2 - H$$
. (2.99)

Комбінуючи (2.89), (2.98) і (2.97), отримуємо для індексу пошкоджуваності Θ :

$$\Theta = \frac{I+\Theta}{2+\Theta}.$$
(2.100)

Вираз (2.100) встановлює залежність між динамічними D і Θ (оскільки Θ пов'язаний з фрактальною розмірністю співвідношенням (2.96)) і структурними (θ) характеристиками процесів перенесення в середовищах з фрактальною геометрією.

Ця закономірність наочно ілюструється графіком залежності $\mu(\theta)$ (рис.2.14) і $\Theta(\theta)$ (рис. 2.15).



Рис. 2.14. Графік залежності показника μ від індексу зв'язності θ

Параметр Θ характеризує, таким чином, тенденцію, закладену в динамічних флуктуаціях. Дійсно, розглядаючи корелятори (2.93) і (2.94), і порівнюючи залежності (2.92) і (2.97), переконуємося, що параметр $\Theta = 1 - J$ має сенс узагальненої координати, що фіксує положення системи у функціональному просторі НСС. Елементами такого простору є всілякі НСС, що розрізняються індексом Θ .



Рис. 2.15. Графік залежності показника Θ від індексу зв'язності heta

У межах $\Theta \to 1$. За цієї умови з (2.97) і (2.91) значення параметра $S \to 1$. Відповідно хаусдорфова розмірність часового ряду $I_S(t)$ прагне до свого максимального значення, рівного, як випливає з (2.90) $D \to 2$. А топологічна ентропія [54]

$$\Xi_{I_{S}}(t)\} \to \frac{1}{2}.$$

За цієї умови часовий ряд $I_s(t)$ виявляє найбільшу зламаність. Така ситуація характеризується проявом багатомасштабних просторовочасових кореляцій, пов'язаних з проявом ефектів пам'яті (немарківські процеси), що виявляють себе в закономірностях зміни параметра Θ і грають ключову роль в динаміці НСС [21].

Наявність пам'яті [29] означає, що якщо у момент часу t' на систему діє сила f(t'), то виникає потік F, величина якого в подальший момент t > t' задається рівністю [29]

$$F(t) = \int_{0}^{t} M(t - t') f(t') dt'$$
 (2.101)

Для системи, що не володіє пам'яттю,, тимчасова залежність функції пам'яті – M(t-t') має вигляд

$$M(t-t') = \gamma \delta(t-t'),$$
 (2.102)

де γ – позитивна постійна, δ - функція Дірака. Підставляючи (2.102) в (2.101), отримуємо зв'язок

$$F(t) = \gamma f(t), \qquad (2.103)$$

згідно якої у відсутність пам'яті на потік F(t) впливає тільки значення сили f(t), що діє в той же момент t. При включенні пам'яті функція в (2.102) розмивається в колоколоподібну залежність, ширина якої визначає інтервал часу, протягом якого дія сили f позначається на величині потоку F [29].

Припустимо, наприклад, що пам'ять зберігається тільки в деяких точках (множини Кантора) [53]. Тоді можна чекати, що її фрактальна розмірність D буде пов'язана з мірою збереження пам'яті.

Так, якщо є деяка величина n, що зберігається, то її просторовочасова залежність n(r, t) визначається рівнянням безперервності [29]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla F, \qquad (2.104)$$

де потік F задається виразом (2.101). У відсутність ефектів пам'яті виконується рівність (2.103), де сила f визначається співвідношенням [29]

$$f = -\nabla \mu, \tag{2.105}$$

і вираз (2.104) приводить до звичайного рівняння

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla(\gamma \nabla \mu) \tag{2.106}$$

дифузійного типу [53].

Оскільки запис (2.106) відповідає повній відсутності пам'яті (D = 0), а при її включенні, відбиваному зростанням показника D, швидкість зміни величини n повинна зменшуватися, то як показано в [29]

$$\frac{\partial^{\nu} n}{\partial t^{\nu}} = \nabla(\gamma \nabla \mu), \quad \nu = l - D.$$
(2.107)

Звернемо увагу на однаковий вид геометричного співвідношення (2.95) і отриманої фізичної залежності n(t).

Звідси можна дійти висновку, що пониження ступеня v = 1 - D похідної рівняння (2.107) відображає факт включення каналів пам'яті, частка яких визначається фрактальною розмірністю D. Частина каналів 1 - D, що залишилася, забезпечує безповоротність системи [29].

Вказані міркування на користь конкретного виду $\nu = 1 - D$ дробового ступеня рівняння (2.107) носять тільки навідний характер. Для їх підтвердження отримаємо умову узгодження, розглядаючи фрактальний механізм розповсюдження обурень [54].

Розглянемо згідно роботі [54] точок $F \subseteq E^n$, вкладену в евклидовий простір E^n розмірністю $n \ge 1$. За визначенням число n, зване розмірністю простору вкладення, набуває цілих позитивних значень. Далі, хай $\varepsilon > 0$ - довільне скільки завгодно мале число. Визначимо nмірний ε -куб в E^n як топологічну множину $\prod_n I(\varepsilon)$, де $I(\varepsilon)$ позначає замкнутий інтервал завдовжки ε . Хай $N_n(\varepsilon)$ - мінімальне число n-

мірних \mathcal{E} -кубів, що покривають безліч точок F з точністю \mathcal{E} . Хаусдорфовою фрактальною розмірністю множини F є таке число [28]:

$$D = \lim \frac{\ln N_n(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}.$$
 (2.108)

Межа (2.108) існує для множини, самоподібності, що володіє властивістю, або масштабною інваріантністю. Масштабно-інваріантні множини заповнюють лише деяку частину охоплюючого евклидового простору E^n . Області E^n , що не належать F, можна розглядати як порожнечі. Наслідком існування порожнеч є статечне убування середньої щіль-

ності множини F в E^n залежно від масштабу r. Отже, щільність фрактала F в E^n поводиться як [54]

$$\wp(F(r)) = \wp_0 \frac{r^D}{r^n} = \wp_0 r^{D-n},$$
 (2.109)

де \wp_0 виступає у якості нормувальної постійної.

Розглянемо далі часовий ряд речової функції скалярної змінної y = f(t), визначений на відрізку [a,b]. Відмітимо, що ми можемо розглядати цей ряд як безліч точок, занурену в двовимірний евклидовий простір. Для обчислення фрактальної розмірності ряду ми можемо безпосередньо використовувати процедуру визначення хаусдорфової (клітинної) розмірності. Оскільки, закономірності накопичення пошкоджуваності виявляються у варіації параметра, побудуємо мінімальне покриття функції f(t) в класі покриттів, що складаються з прямокутників з основою r і висотою V(r), що дорівнює різниці між максимальним і мінімальним значеннями функції на цьому відрізку. Тоді відповідно до (2.109) $V(r) \sim r^{-\Theta}$ при $r \to 0$. Тут $\Theta = D - 1$ і характеризує параметр пошкоджуваності.

Необхідно підкреслити, що визначення хаусдорфової розмірності фрактала (2.108) істотним чином використовує вкладення $F \subseteq E^n$. Насправді, величина D визначається через потужність покриття F nмірними \mathcal{E} -кубами і в цьому сенсі є зовнішньою характеристикою фрактала, віднесеною до E^n .

Параметр $\Theta = D - 1$ формально збігається з показником ступеня при параметрі *r* в (2.109), що визначає розмір гіперсфери, в якій поміщена ефективна маса фрактала. Тобто ефективна маса, ув'язнена усередині гіперсфери радіусом *r*, росте з *r* як r^{D-1} [54]. Таким чином, можна говорити про сенс параметра пошкоджуваності Θ з погляду кінетики опису, як параметра, що характеризує щільність шляхів перебігу, по яких відбувається розповсюдження активності в середовищі.

Вище з феноменологічного аналізу провідності перколяційних кластерів було показано, що при дифузії Леві активність блукання дефектів по фракталу (дрейфова швидкість часточки) виявляється нелінійною функцією опору середовища (здатності протистояти пошкодженням, що накопичуються) від потенціалу. По сенсу залежності $V \sim R^{1-D}$ [60] величина R є синергетичним аналогом опору середовища до розповсюдження обурень. Таким чином, отримано узгодження і з кінетичними рівняннями, що визначають фундаментальні структурні властивості турбулентності поблизу НСС.

Безпосереднє спостереження кластерної структури пошкоджень доступне тільки за допомогою таких складних методів як рентгеноструктурний аналіз, який неможливо реалізувати в динаміці, тоді як діагностичними можливостями для динамічного спостереження володіють акти саме елементарних пошкоджень по емісійних послідовностях, що генеруються.

Порівняння кореляційних функцій для числа кластерів і числа елементарних пошкоджень показало, що зростання масштабу кластерів руйнування, що характеризує перехід системи на стадію, передуючу руйнуванню, виявляється в кінетичних залежностях числа елементарних пошкоджень, завдяки чому можлива побудова методу контролю, спираючись на характеристики, доступні безпосередньому спостереженню: середина ділянки негативної кореляції на кореляційній функції тимчасового ряду числа елементарних пошкоджень відповідає появі другої ділянки позитивної кореляції на кореляційній функції ряду числа кластерів (рис. 2.16). Це відповідає також середині ділянки лінійного убування числа кластерів на кінетичній кривій (рис. 2.17).



Рис. 2.16. Порівняння кінетичних залежностей числа кластерів і числа елементарних пошкоджень



Рис. 2.17. Зіставлення кореляційних функцій числа кластерів і числа елементарних пошкоджень



від його середньоквадратичного радіуса

Залежність маси кластера елементарних ушкоджень від його середньоквадратичного радіуса описується універсальною степеневою за-

лежністю (рис. 2.18), що свідчить про фрактальну організацію структури кластерів. Функція розподілу числа кластерів по локальній щільності (рис. 2.19) має безперервну ділянку, яка практично співпадає для всіх значень середньої щільності зайнятих осередків. Така поведінка функцій розподілу вказує на автомодельність формування кластерної структури по параметру локальної щільності.

При збільшенні розміру кластерів у функції розподілу маси кластерів по розмірах (рис.2.20) виявляється ступінчаста залежність, що супроводжується збільшенням ширини і висоти ступенів на хвості функції розподіли, які не приводять до приросту маси кластерів. Така поведінка функцій розподілу свідчить про те, що відбувається «вимирання» кластерів проміжних розмірів при утворенні сполучаючого кластера з малою локальною щільністю по мірі наближення системи до моменту руйнування

Вище при описі вірогідності руйнування системи при накопиченні структурних пошкоджень отриманий статечний закон, в лівій частині якого стоїть параметр, визначуваний як відношення другого центрального і першого початкового моментів розподілу, характеризуючого масштаб варіації події (в даному випадку маси кластера):



$$V_M = \frac{\sqrt{\int p(x)x^2 dx}}{\int p(x)x dx}$$



Рис. 2.20. Функція розподілу маси кластерів по розмірах

Оскільки інтеграли для чисельника і знаменника в цьому виразі пропорційні змінній, їх відношення є не чутливим до втрати частини даних про дрібні події.

Величина V характеризує масштаб варіації події (у даному випадку маси кластера) і показує, подій якого масштабу слід очікувати.

Для нормальних (некритичних) розподілів масштаб збігається по порядку величини з математичним очікуванням (середнім), оскільки інтеграли для всіх моментів набираються в одній і тій же області, тоді як для розподілів з важкими (довгими) хвостами масштаб значно перевершує середнє значення. Як чисельна характеристика ступеня ризику системи можна ввести характеристику, рівну відношенню масштабу до середнього, яка для некритичних розподілів близька до одиниці, а для критичних систем багато більше одиниці. Для модельованої системи масштаб розподілу кластерів пошкоджень по масах і ступінь критичності зростають (рис. 2.21). При цьому для значень часів, відповідних зміні монотонності на кінетичних і кореляційних залежностях, зростання параметра істотно збільшується. Це визначає параметр $\Theta = D - 1$ і критерій переходу еволюції кластерної структури на стадію, що безпосередньо передує руйнуванню.

Критерий визначається наступним чином, використовуючи (2.94):

$$Q_{I}(t) = 2^{1-2\Theta} - 1$$



Рис. 2.21. Ступінь критичності кластерної системи

Для $\Theta = 0.5$ корелятор $Q_J(t) = 0$ - сплески і падіння часового ряду абсолютно випадкові. При $\Theta > 0.5$ корелятор $Q_J(t) < 0$ - сплеск функції в минулому означає швидке падіння в майбутньому. Навпаки, при $\Theta < 0.5$ корелятор $Q_J(t) > 0$ - сплеск в минулому означає зріст в майбутньому.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто завдання про накопичення пошкоджень на моделях регулярних фракталів. Навантажуване середовище розглядається як нелінійна динамічна ієрархічна система, що еволюціонує за законами синергетики. Фрактальний підхід дозволяє детальніше досліджувати з отриманням кількісних характеристик тимчасову еволюцію процесу пошкоджуваності. Дискретність процесу накопичення пошкоджуваності моделюється за допомогою фрактального дерева, яке дозволяє забезпечити масштабно-інваріантний механізм накопичення дефектності. Проведений аналіз показує, що подібний емпіричний підхід є обгрунтованим у тому випадку, коли завдання сформульоване як еволюційне, а умови навантаження забезпечують досягнення керуючих параметрів порогових значень, при перевищенні яких в системі спостерігається відмова. 2. Встановлений зв'язок кінетики механізму напрацювання на відмову з принципами нерівноважної термодинаміки. На основі статистично-термодинамічного опису еволюції системи розвинені визначальні співвідношення, що додають інформаційну значущість взаємозв'язку акустичних послідовностей і структурного чинника як передвісника колапсу системи. Визначальні співвідношення, записані у вигляді еволюційних рівнянь, забезпечують конкуренцію позитивних і негативних зворотних зв'язків між параметрами навантажуваного середовища, для якого враховані ефекти накопичення і дисипації енергії в системі. Теоретична і практична цінність отриманого результату пов'язана з можливістю отримання інформації про динаміку стану системи за характеристиками імовірнісного опису самохідних змін визначальної ознаки. На цій основі можуть бути розроблені алгоритми і схемотехнічні рішення для ідентифікації стану системи за сигналами емісійних послідовностей, засновані на принципах інваріантності.

Перелік посилань до розділу 2

- 1. Анищенко В.С. Статистичекие свойства динамического хаосаю / Анищенко В.С. // УФН, 2005. Т.175. №2. С. 163-178.
- 2. Арнольд В. И. Теория катастроф / В.Арнольд. М.: Наука, 1990.
- Архипова Н. И. Управление в чрезвычайных ситуациях / Архипова Н. И., Кульба В. В. — М.: РГГУ, 1998.
- 4. Афраймович В. С., Быков В. В., Шильников Л. П. ДАН СССР, 1977.
- 5. Ахиезер А.И. Поля и фундаментальные взаимодействия / Ахиезер А.И., Пелетминский С.В. - Киев: Наукова думка, 1986.
- 6. Баренблатт Г.И. Модель нелокального накопления повреждений / Баренблатт Г.И. // Физ. мезомех, 2003. - Т. 6. - № 4. - С. 85-92.
- Будаев В.П. Наблюдения перемежаемости и обобщенного самоподобия в турбулентных пограничных слоях: на пути к определению количественных характеристик переноса / В.П. Будаев, С.П. Савин, Л.М. Зеленый. // Уфн, 2011. - Т. 181. - №9.
- Быстрай Г. П. Методы синергетики в анализе структурных сдвигов в промышленности: разработка унифицированных моделей и алгоритмов анализа устойчивости текущих состояний в условиях внешнего и внутреннего управления / Г. Быстрай // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2003. Вып. 2. С. 71–88.
- Ван Кампен Н. Г. Стохастические процессы в физике и химии / Ван Кампен Н. Г. - М.: Высшая школа, 1990.
- Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Обухов А.М. Системы гидродинамического типа и их применение / Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Обухов А.М. - М.: Наука. Гл. Редд физмат. Лит., 1981. - 361 с.

- Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / Гленсдорф П., Пригожин И. - М.: УРСС, 2003. - 280 с.
- Глушков В.М. Применение одного класса динамических моделей к исследованию иммунных систетм / Глушков В.М., Иванов В.В., Яненко В.М. // Математические методы в биологии. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 40-51.
- Головин Ю.И. Новые принципы, техника и результаты исследования динамических характеристик твердых тел в микрообъемах / Головин Ю.И., Тюрин А.И. // ЖТФ, 2000. - Т.70. - Вып.5. – С. 82-91.
- Должанский Φ. В. Нелинейные системы гидродинамического типа / Φ. В. Должанский, В. И. Кляцкин, А. М. Обухов, М. А. Чусов. - М.: Наука, 1974.
- Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов / Екобори Т. – Киев: Наукова думка, 1978. – 352 с.
- Заславский Г. М. Введение в нелинейную физику / Г. М. Заславский, Р. З. Сагдеев. // От осциллятора до турбулентности и хаоса. – М.: Наука, 1988.
- Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах / Заславский Г.М. – М-Ижевск: Ин-т комп. Исслед., 2004. – 288 с.
- Зеленый М.Л. Фрактальная топология и странная кинетика / Зеленый М.Л., Милованов А.В. // УФН, 2004. – Т.174. - №8. – С. 809-852.
- 19. Иванова В.С. Разрушение металлов / В.Иванова. М.: Металлургия. 1979. 168 с.
- Ионов В.Н., Селиванов В.В. Динамика разрушения деформируемого тела / Ионов В.Н., Селиванов В.В. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
- Каток А. Б. Введение в современную теорию динамических систем / А. Каток, Б. Хасселблат. М.: Факториал, 1999. 768 с.
- 22. 190. Качанов Л. М. Основы механики разрушения / Л.Качанов. М.: Наука, 1974. 312 с.
- Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса / Климонтович Ю.Л. - М.: Наука, 1990. – 327 с.
- Кляцкин В. И. Стохастические уравнения глазами физика / В. Кляцкин. -М.: Физматлит, 2001.
- Князева Е. Н. Законы эволюции и самоорганизация сложных систем / Князева Е. Н., Курдюмов С. П. - М.: Наука, 1994.
- 26. Кокс Д. Теория восстановления / Кокс Д., Смит В. М.: Мир, 1967.
- Колесников А. А. Основы теории синергетического управления / А.Колесников - М.: Испо-Сервис, 2000.
- 28. Колмогоров А. Н. Новый инвариант для транзитивных динамических систем / А. Н. Колмогоров. // Доклады АН СССР 119, 861, 1958.
- 29. Коренблит И.Я, Шредер Е.Ф. // УФН, 1989. Т.57. № 2. С. 331.
- Кравцов Ю.А. Случайность, детерминированность, предсказуемость / Ю.Кравцов // УФН, 1989. - Т. 158. - Вып 1. - С. 93-121.
- 31. Кузнецов С.П. Динамический хаос / Кузнецов С.П. М.: Наука, 2000. 452 с.
- Ландау Л. Статистическая физика / Ландау Л., Лифшиц М. М.: Физматлит, 2005. - 616 с.
- 33. Левин В.А., Калинин В.В., Зингерман К.М., Вершинин А.В. Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование / Левин В.А., Калинин В.В., Зингерман К.М., Вершинин А.В.; под ред. Левина В.А. - М.: Физматлит, 2007. - 392 с.

- Лихтенберг А. Регулярная и стохастическая динамика / Лихтенберг А., Либерман М. - М.: Мир, 1984. - С. 528.
- Логунов М.Ю. Перемешивание и ляпуновские показатели хаотических систем / Логунов М.Ю., Бутковский О.Я. // Письма в ЖТФ,. 2008. Т.78. Вып.8. С. 1-8.
- 36. Лоренц Э. //Странные аттраткторы / Э. Лоренц М.:Мир, 1981. С. 88-116.
- Лоскутов А.Ю. Основы теории сложных систем / Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. – М.-Ижевск: Ин-ткомп. Исслед, 2007. – 620 с.
- Малинецкий Г. Г. Мониторинг, анализ и прогноз опасностей как задачи национальной информационной системы / Малинецкий Г. Г., Подлазов А. В., Кузнецов И. В. // Информационные технологии и вычислительные системы, 2004. - № 4.
- Малинецкий Г. Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии / Малинецкий Г. Г. // Информационные технологии и вычислительные системы, 2002. № 4. С. 83–108.
- Малинин В.Г. Структурно-аналитическая мезомеханика деформируемого твердого тела / Малинин В.Г., Малинина Н.А. // Физ. мезомех, 2005. – Т.5. -№8. – С. 31-45.
- 41. Марков П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система / Марков П.В. // Физ. мезомех, 2005. Т.6. №8. С.39-56.
- 42. Милованов А. В. Дисс. ... докт. физ.-мат. Наук. М.: Институт космических исследований, 2003.
- 43. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения / Наймарк О.Б. // Физ. Мезомех, 2003. - Т. 6. - № 4. - С. 45-72.
- 44. Нахушев А. М. Дробное исчисление и его применение / Нахушев А. М. М.: Физматлит, 2003. - С. 102.
- Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
- Нестационарные структуры и диффузионный хаос / Т. С. Ахромеева, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий, А. А. Самарский. — М.: Наука, 1992.
- Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов / И.Новиков. -М., 1975. - 208 с.
- Олемской А.И. Синергетика конденсированной среды / Олемской А.И.. Хоменко А.В. – Сумы: Изд-во СумДУ, 2002. – 373 с.
- Олемской А.И. Синергетика пластической деформации / Олемской А.И., Хоменко А.В. // УФМ, 2001. – Т.2. - №3. – С. 189-264.
- 50. Олемской А.И., Флат А.Я. // УФН, 1993. Т.63. № 12. С. 331.
- Олемской А.И. Эволюция дефектной структуры твердого тела в процессе пластической деформации / Олемской А.И., Скляр И.А. // УФН, 1992. – Т. 162. - №6.- С. 29-79.
- 52. Осяев А.Т. Виброакустическая диагностика механического оборудования / Осяев А.Т., Рогов С.Н. // Журнал «Локомотив», 1998. - №11. - С. 17-19.
- 53. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов / Панин В.Е. // Механика твердого тела, 1999. №5. С. 88-108.

- Подлазов А.В. Ветвящийся процесс с зависимыми частицами как модель катастрофического поведения / Подлазов А.В. // Математическое моделирование, 2002. - Т.14. - №9. - С. 53-58.
- Пригожин И. Познание сложного. Введение / Пригожин И., Николис Г. -М.:УРСС, 2003. - 342 с.
- Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / Пригожин И., Кондепуди Д. - М.: Мир, 2002. - 461 с.
- Пригожин И. Человек перед лицом неопределенности / Пригожин И. -Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. - 304 с.
- Рабинович М.И. Регулярная и хаотическая динамика структур в течениях жидкости / Рабинович М.И., Сущик М.М. // УФН, 1990. – Т.160. - №1. – С. 3060.
- Романовский Ю.М. Математическая биофизика / Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. М.: Главная редакция физикоматематической литературы, 1984. – 304 с.
- Романовский М.Ю. Функциональные блуждания Леви / М.Романовский. // Тр. Ин-та общей физики РАН, 2009. – Т.65. – С. 20-28.
- 61. Современное состояние теории исследования операций. М., 1979.
- 62. Учайкин В. В. Метод дробных производных / Учайкин В. В. Ульяновск: Артишок, 2008. С. 100.
- 63. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. М.: Мир, 1991. 254 с.
- 64. Хайтун С. Д. Механика и необратимость / С.Хайтун М.: Янус, 1996.
- Чернова Г.В. Управление рисками / Чернова Г.В., Кудрявцева А.А. М: ТК Велби Проспект, 2003.
- Чукбар К. В. Стохастический перенос и дробные производные / К. В. Чукбар. - ЖЭТФ 108, 1875, 1995.
- 67. Шанченко П.А. Техническое обслуживание и ремонт тягового подвижного состава на зарубежных железных дорогах / П. Шанченко // Локомотивы и локомотивное хозяйство. М.: ЦНИИТЭИ МПС, 1988. - Вып. 2. - 21 с.
- Aranson I.S. The world of the complex Ginzburg-Landau equation / Aranson I.S., Kramer L. // Reviews of Modern Physics, 2002. - V.74. - N.1. - P.99-143.
- Bartelemy P. A Levy ight for light / Bartelemy P., Bertolotti J., Wiersma D. // Nature, 2008. - V. 453. - P. 495-498.
- 70. Chate H. Phase diagram of the two-dimensional complex Ginzburg-Landau equation / Chate H., Manneville P. // Physica A, 1996. V.224. P. 348-368.
- Hausdorff F. Dimension und äußeres Maß / F. Hausdorff. Math. Annalen 79, 157 (1919).
- Kadanoff L.P. Scaling and universality in avalanches / Kadanoff L.P., Nagel S.R., Wu L., Zhou S. // Phys. Rev. A., 1989. - V.39. - N12. - P. 6524-6537.
- Sapsis T. Clustering criterion for inertial particles in two-dimensional timeperiodic and three-dimensional steady flows / T. Sapsis, G. Haller. // Chaos 20, 2010.
- 74. Schiff I. Quantum Mechanics / Schiff I. Tokyo: McGraw Hill, 1968. Chap 7.
- 75. Visualizing Transport Structures of Time-Dependent Flow Fields / Kuangyu Shi, Hans-Peter Seidel, Holger Theisel, Tino Weinkauf, Hans-Christian Hege // Published by the IEEE Computer Society, 2008.

Розділ З

ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНИХ МЕТОДІВ Для знаходження дефектів та оцінки стану омпн

3.1 Існуючі методи визначення напружено-деформованого стану з використанням магнітометрії

Контроль напружено-деформованого стану сталевих металоконструкцій є одним з визначальних чинників в оцінці надійності технічних об'єктів у процесі експлуатації.

Із упровадженням у виробництво зварних металоконструкцій необхідність оцінки залишкового ресурсу ставала все більш актуальною на всіх стадіях життєвого циклу виробу, так як темпи старіння обладнання значно випереджають темпи технічного переозброєння.

Так, наприклад, за останні двадцять років через фізичне старіння більше 85% кранового парку вийшли за межі нормативного терміну експлуатації, що створює загрозу промисловій безпеці. Більш того, після розвалу СРСР і наслідків фінансових і економічних криз замість збанкрутілих підприємств на звільнених площах з'явилися нові, але з іншим профілем виробництва, власники яких стали основними споживачами на «вторинному ринку» дешевої кранової техніки, яка невідомо скільки років була в експлуатації.

В якості одного з напрямків вирішення цієї проблеми, на підставі багаторічних досліджень, набула поширення практика діагностики металоконструкцій при експертизі промислової безпеки та прогнозуванні ресурсу безаварійної експлуатації технічних об'єктів на основі вимірювання магнітної характеристики металу – коерцитивної сили (H_c).

При оцінці напружено-деформованого стану металоконструкцій в основу методик магнітної діагностики (неруйнівних методів контролю) покладені взаємозв'язок і кореляційні залежності магнітних, електромагнітних і механічних властивостей сталей і сплавів, які визначаються структурним станом, хімічним і фазовим складами речовини.

Із усіх магнітних властивостей до структурно-чутливих характеристик відносяться крива намагнічування, форма і площа петлі магнітного гістерезису (мається на увазі приватний усталений цикл, для чого роблять багаторазове комутування магнітного поля від +H_{max} до –H_{max}) та їх основні параметри: коерцитивна сила H_c, залишкова індукція B_r або залишкова намагніченість M_r, магнітна проникність (сприйнятливість) речовини µ.

Структурно-чутливі магнітні характеристики анізотропні; вони чутливі до кристалографічної структури, змінам мікро- і макронапруг, до мікроструктури, форми і розмірів.

Величина коерцитивної сили H_c залежить від обсягу і розмірів (дисперсності) включень.

Наприклад, магнітні та електричні властивості мікроструктури сталей залежать від вмісту вуглецю і легуючих елементів.

Підвищення вмісту вуглецю призводить до збільшення коерцитивної сили, електроопору та зниження намагніченості насичення.

Наявність в сталях 09Г2С, 20ХНЗА легуючих елементів також призводить до збільшення (Cr, Si, Ni, Cu) або зменшення коерцитивної сили.

Аналізуючи вплив різних структурних параметрів на гальмування ковзаючих дислокацій і затримку зміщення доменних меж, можна відзначити спільність їх впливу на механічні і магнітні властивості.

Так, підвищення в структурі сталі щільності дислокацій (N) супроводжується збільшенням міцності і значень коерцитивної сили.

Кореляційний зв'язок між магнітними характеристиками і механічними властивостями – показниками якості ($\sigma_{0,2}$; σ_B ; твердість; величина зерна; показники деформаційного зміцнення і нерівномірної пластичної деформації тощо) визначається на підставі інформаційного масиву для кожної марки сталі або груп марок сталей, відрізняються в основному вмістом вуглецю і «магнітожорсткими» або «магнітом'якими» легуючими елементами.

Неруйнівний магнітний контроль механічних властивостей феромагнітних матеріалів заснований на кореляції між магнітними і фізикомеханічними властивостями, коли вони одночасно залежать від одних і тих же факторів: хімічного складу, режиму термічної обробки, пластичної деформації, мікро- і макронапруг, розташування дислокацій та ін.

У разі вуглецевих малолегованих сталей перераховані вище фактори одночасно і однозначно впливають на механічні і магнітні властивості металу. Тому неруйнівний магнітний метод може успішно застосовуватися для контролю напружено-деформованого стану металу, рівня пластичної деформації і втомних пошкоджень найбільш навантажених вузлів ОМПН, які працюють в умовах тривалого циклічного навантаження.

Мікро- та макродефекти структури, накопичуючись в металі в процесі циклічного навантаження при розтягуванні, стисненні, вигині або крученні, як би збирають і зберігають інформацію, однозначно пов'язану з максимальними величинами діючих навантажень, в результаті чого структура металу сталевої деталі конструкції виконує функції своєрідного запам'ятовуючого датчика пікового значення сили. А ряд магнітних параметрів, однозначно пов'язаних з кількістю порушень структури металу, таким чином, є своєрідним відображенням силового режиму роботи конструкції.

В якості основного контрольованого магнітного параметра обирають величину коерцитивної сили H_c, оскільки вона однозначно пов'язана із залишковою пластичною деформацією є_{рі} при статичному і циклічному навантаженні металоконструкцій в процесі експлуатації.

За своєю природою H_c і ε_{pl} є взаємопов'язаними параметрами, зростаючими при циклічному навантаженні, як це можна бачити при аналізі магнітних і деформаційних петель гістерезису (рис. 3.1) [38]. За своїм фізичним змістом коерцитивна сила H_c – це напруженість магнітного поля, необхідна для повного розмагнічування попередньо намагніченого до насичення феромагнетика (при B=0 щодо граничної петлі гістерезису), і може бути представлена як

$$H_c = \frac{B}{E} + \left(\frac{B}{K}\right)^{\frac{1}{n}},\tag{3.1}$$

де: В – залишкова індукція;

К – циклічний коефіцієнт напруги;

n – циклічний коефіцієнт зміцнення;

Е – модуль пружності.

Залишкова деформація є_{рі} – амплітуда необоротної деформації – визначається аналогічними параметрами

$$\varepsilon_{p1} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}},\tag{3.2}$$

де: о – амплітуда навантаження.

При наявності кореляційних залежностей між H_c і є_{pl} за величиною коерцитивної сили можна вести контроль накопичення пошкоджень в

металі, пружно-пластичної деформації металу, а також прогнозувати втомну довговічність металу.

Практично всі види сталей, що застосовуються при конструюванні несучих елементів машин і механізмів, відносяться до класу розупрочнених, в яких величина H_c порівняно невисока: від 1,5 до 10 А/см. Для таких сталей, як правило, існує стійка кореляція магнітних і фізикомеханічних властивостей з коефіцієнтом кореляції не гірше, ніж 0,9. Тому магнітний метод може забезпечити оперативний контроль структурного стану несучих елементів ОМПН.



Рис. 3.1. Магнітна і деформаційна петлі гістерезису при МЦУ

Номограми навантаження для сталей Ст3, ВСт3сп, 09Г2С, 17Г1С, 20ХНЗА приведені на рис. 3.2.

За аналогією з контролем механічних властивостей сталей на основі діаграми навантаження в методиці магнітного контролю введені наступні базові параметри стану металу:

- 0_с початкове значення коерцитивної сили, при відсутності внутрішніх напружень воно мінімальне для будь-якої марки сталі;
- Т_с відповідають рівню внутрішніх напружень, рівних фізичній межі плинності (σ^T);
- В_с відповідає досягненню межі міцності сталі (σ^В);
- N_{c} відповідає досягненню межі втоми (σ^{0}) при МЦУ.



Рис. 3.2. Номограми для визначення величин напруги за значеннями коерцитивної сили в конструкціях із сталей: 1 – Ст3; 2 – ВСт3сп; 3 – 09Г2С; 4 – 17Г1С; 5 – 20ХНЗА

Залежно від прийнятих в нормативно-технічній документації критеріїв, при розрахунку конструкційної міцності несучих елементів, критичні значення коерцитивної сили можуть бути встановлені на рівні межі текучості HT_c або межі міцності HB_c.

Характерно, що при оцінці ресурсу металоконструкції значення HN_c і HB_c збігаються, оскільки граничний стан металу за величиною коерцитивної сили однаковий для циклічного і статичного навантаження.

Відповідно до MB 0.00-7.01-05 контроль стану елементів металоконструкцій здійснюється на основі номограм, побудованих для кожного типу сталі зі статистичною обробкою результатів за Державним стандартом 30415-96.

Зміна величини коерцитивної сили в металі, як зазначалося вище, проводиться магнітним структуроскопом КРМ-ЦК-2М, розробленим НВФ "СНР" і МНПО "СПЕКТР" для діагностування об'єктів Держпромгірнагляду МНС України і Держнаглядохоронпраці України. Структуроскоп пройшов Міжвідомчу комісію, має Сертифікат відповідності метрологічним нормам №0000482. При наявності кореляційних залежностей за Державним стандартом 30415-96, приладом можна вести контроль напруг, деформацій і ресурсу сталевих ОМПН.

Кількісними критеріями оцінки стану металоконструкції служать максимальні значення коерцитивної сили H_{maxc} в розрахункових елементах підйомних споруд в процесі експлуатації. Підвищення H_c в порівнянні з вихідним значенням H_{0c} свідчить про зростання залишкових внутрішніх напружень і деформацій. З переходом в пружно-пластичний стан ($H_{maxc} = HT_c$) метал починає втрачати запас пластичності, який остаточно вичерпується на стадії розупрочненя і переходу до руйнування, коли ($H_{maxc} = HB_c$). Тому весь прогнозований термін роботи конструкції може бути розділений на етапи по мірі накопичення залишкових деформацій і мікроушкоджень в найбільш навантажених елементах металоконструкції. МВ 0.00-7.01-05 передбачені три режими експлуатації ОМПН:

1. *Режим "надійної" експлуатації* при H_{maxe} << НТ_с, коли метал працює в пружній області діаграми навантаження і максимальні напруження не перевищують фізичної межі пружності сталі.

2. Режим "контрольованої" експлуатації при Н_{тахс} ≤ HT_c, коли окремі елементи металоконструкції працюють в пружно-пластичній області діаграми навантаження, а максимальні залишкові напруги досягають фізичної межі плинності сталі.

3. "Критичний" режим експлуатації при $HT_c \leq H_{maxc} \leq HB_c$, коли окремі елементи ОМПН працюють в пружно-пластичній та пластичній областях діаграми навантаження і максимальні напруги перевищують межу текучості сталі, в результаті чого з'являються втомні тріщини.

При роботі в режимі "контрольованої" експлуатації необхідні:

 організація постійного візуального контролю за елементами металоконструкцій, що потрапили в область пружно-пластичних деформацій;

 при проведенні чергових повних технічних оглядах (ПТО) проводити магнітний (коерцитиметричний) контроль з фіксацією результатів замірів H_c в паспорті ОМПН, що дозволить відстежувати динаміку розвитку втоми напружено-деформованого стану металу.

При роботі в "критичному" режимі необхідно:

– прозвести посилення елементів, у яких $H_{maxc} \ge 0.9 \text{ HB}_{c}$, оскільки в кілька разів зростає технічний ризик руйнування;

- виключити можливість перевантаження ОМПН;

- обмежити термін наступного обстеження до 1 року.

Нормативною базою магнітного (коерцитиметричного) контролю (МТКС) є: Міжнародний стандарт ІСО 4301, міждержавний стандарт ДСТ 30415-96 (зі змін. 1).

В Україні з 2005 року діють «Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу: MB 0.00-7.01-05» [20]. У даному нормативному документі наведено номограми для визначення напруг за результатами магнітного контролю при одноосному розтягуванні пласких зразків для цілої низки конструкційних сталей.

Так, з 2012 р. проведення магнітного коерцитиметричного контролю введено як обов'язковий етап робіт при проведенні експертного обстеження несучих елементів металоконструкцій портальних кранів, які відпрацювали нормативний термін служби (ОМД 22460848.003-2012).

Таблиця 3.1

Сталь 09Г2С									
Напруга що, виникає від прикладеного навантажен- ня, МПа	0	92	33	67	08	50	92	50	90
Нс, А/см	3,66	4,22	4,4	4,16	4,58	5,3	8,2	9,0	9,5
Сталь Ст Зпс									
Напруга що, виникає від прикладеного навантажен- ня, МПа	0	267	225	300	342	383	417	458	480
Нс, А/см	2,98	2,87	2,86	2,52	3,3	5,41	6,21	7,11	7,5
Сталь Ст 0									
Напруга що, виникає від прикладеного навантажен- ня, МПа	0	200	233	267	300	333	367	400	433
Нс, А/см	2,84	2,76	2,98	2,54	3,22	7,06	7,44	7,81	8,42

Результати дослідження зростання коерцитивної сили від прикладеного одноосного навантаження до пласких зразків із сталей 09Г2С, Ст3пс, Ст0

Результати дослідження зростання коерцитивної сили від прикладеного одноосного навантаження до пласких зразків із сталей 09Г2С, Ст3пс, Ст0 наведено в табл. 3.1 [6].

Залежності коерцитивної сили від напруги, яка виникає при одноосному прикладенні навантаження до пласких зразків із сталей 09Г2С, Ст3пс, Ст0 наведено на графику (рис. 3.3).

Як видно із рис. 3.3 зростання коерцитивної сили при переході із пружної зони деформації в пластичну відбувається:

– для сталей 09Г2С, Ст3пс – плавно;

 – для сталі Ст0 – різко (коерцитивна сила при цьому збільшується в два рази).



в сталях 09Г2С, Ст3пс, Ст0

Коерцитивна сила від прикладеного осевого навантаження, що розтягує, починає значно змінюватися (зростати на 50-100%) тільки при переході в пружнопластичну зону деформації металу зразків. У зоні пружних деформацій зміна коерцитивної сили при збільшенні навантаження становить не більше 10%.

У [11] розроблено метод оцінки залишкового ресурсу основного метала нафтогазопроводів, що базується на багатократному вимірюванні твердості з малим навантаженням.

Розробці методів та засобів опосередкованого контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій, що дозволяють за мінімальною кількістю інформативних параметрів виявляти момент зародження мікродефектів та контролювати їх розвиток, присвячена робота [4]. У ній досліджено зміни енергетичних процесів, що виникають під час структурних перетворень у металах конструкції, яка перебуває у напруженодеформованому стані. Встановлено інформативний параметр, що характеризує процес зародження мікротріщини, побудовано і програмно реалізовано математичну термодинамічну модель, яка дозволить за зміною температури на поверхні металічної напружено-деформованої конструкції оцінювати зародження та розвиток мікротріщини. Розроблено систему контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях та визначено її основні метрологічні характеристики та її програмне забезпечення.

Метою роботи [37] є підвищення достовірності ферозондового контролю дефектів великогабаритних деталей у сукупному постійному і змінному прикладених магнітних полях на основі науково обґрунтованого вибору параметрів базових елементів магнітної системи. Запропоновано і науково обґрунтовано комбінований метод контролю дефектів великогабаритних феромагнітних виробів в прикладених магнітному і електромагнітному полях з фіксацією дефектів ферозондами і магнітомодуляційними вимірювальними перетворювачами. Генератором полів локального намагнічування є П-подібні електромагніти, між полюсами яких розміщені магніточутливі елементи: ферозонди, магнітомодуляційні головки.

У [6] розроблено алгоритм оцінки залишкового ресурсу оболонкових конструкцій із сталі 09Г2С, що працюють в умовах квазістатичного навантаження, на основі зв'язку між зміною швидкості поздовжних ультразвукових хвиль, напруженості постійного магнітного поля і механічних характеристик при накопиченні пошкодженостей під впливом квазістатичного навантаження.

У працях [3, 5] представлено та науково обгрунтовано эфект – магнітопластика, що лежить в основі метода магнітної пам'яті металу (МПМ). Авторами розроблено діаграму магніто-механичного стану феромагнетика при взаємодії силових і магнітних полів. Розглянуто фізичну суть втомленої пошкодженості металу і запропоновано модель розвитку процесу накопичення втомленої пошкодженості, що відкриває можливість кількісної оцінки стану матеріалу при використанні метода МПМ та інших методів.

Також досліджено зміни магнітних характеристик при малоцикловому навантаженні та статичному згинанні зразків із сталі 09Г2С. Отримана залежність розмаху петлі магнітопружного гистерезису градієнта напруженості магнітного поля від рівня накопичених втомлених пошкодженостей. Установлено, що початкове навантаження зразків призводить до стрибкоподібного зменшення розмаху градієнта напруженості магнітного поля, яке при наступному навантаженні переходить в плавне лінійне зниження. Також установлено, що в зоні потенціального руйнування зразків плаского типу, пластин і тонкостінних оболонок, параметр відносної напруженості магнітного поля приймає максимальне значення, що є діагностичною ознакою для виявлення потенціальних зон руйнування обладнання на різних стадіях його експлуатації. Показано, що коерцитивна сила є інформативним параметром для оцінки рівня накопичених втомлених пошкодженостей. Відомий спосіб діагностування технічного стану гумотросових стрічок в експлуатаційних умовах [20], в якому до сигналів, пропорційних дефектам у визначеному перерізі контролюючої стрічки додають сигнали, пропорційні дефектам, виявлених раніше і попередньо зменшених за законами зміни концентрації напруги, викликаної цими дефектами, який відрізняється тим, що через постійні інтервали часу за допомогою інструментальних методів виявляють обірвані троси по всій довжині конвеєрної стрічки, визначають максимальну величину механічного напруження в цілих тросах, розташованих поряд з обірваними і вираховують запас міцності в цих тросах при максимальному навантаженні конвеєрної стрічки з урахуванням його зменшення за рахунок циклічного навантаження в залежності від терміну експлуатації за одержаними результатами прогнозують зміну запасу міцності на майбутній термін експлуатації та визначають періодичність контролювання даної стрічки.

Згідно зі способом діагностування виробничих об'єктів [27], що заснований на аналізі акустичних або вібраційних сигналів методами цифрової обробки сигналу, в акустичному або вібраційному сигналі отримують похідний від сигналу ряд локальної фрактальної розмірності, виявляють зміни в ряді локальної фрактальної розмірності сигналу, виділяють точку розладнання у сигналі з поведінки ряду локальної фрактальної розмірності, визначають границі між реалізаціями різних режимів динаміки сигналу, яка сформувалася, отримують діагноз, відповідно до якого виробляють керуючий вплив.

Спосіб діагностування виробничих об'єктів реалізується наступним чином.

Складний акустичний або вібраційний сигнал представляють у вигляді самоподібного часового ряду Is(t), для якого визначають дисперсію прирощення в будь-який момент часу t. Отримують похідний від вхідного сигналу ряд локальної фрактальної розмірності, для чого розглядають корелятор Qj(t) минулих і майбутніх прирощень самоподібного часового ряду сигналу Is(t). Будують похідну функцію $\mu(t)$ як значення локальної фрактальної розмірності μ ряду спостережуваного сигналу, визначене на мінімальному, попередньому t, інтервалі. Виявляють зміни в ряді $\mu(t)$ локальної фрактальної розмірності μ сигналу Is(t). Величина $\mu(t)$ визначає статистику флуктуацій ряду Is(t) сигналу, пов'язану зі зміною стану об'єкта. Для Гаусових флуктуацій $\mu=1/2$ корелятор Qj(t)=0 – сплески і падіння часового ряду IS(t) абсолютно випадкові. При $1/2<\mu\leq1$ корелятор Qj(t)<0– сплеск ряду Is(t) в минулому, означає швидке падіння в майбутньому. Навпаки, при $0\leq\mu<1/2$ корелятор Qj(t)>0 – сплеск в минулому, означає зростання Is(t) в майбутньому. Виділяють точку розлагодження у вхідному сигналі *Is(t)* з поведінки ряду $\mu(t)$ локальної фрактальної розмірності. На інтервалі, де ряд поводиться відносно стабільно, $\mu(t)>0,5$. Далі, з розвитком процесу автоколивань, $\mu(t)$ різко падає нижче значення $\mu=0,5$ і, нарешті, в інтервалі, де відбувається вихід з процесу автоколивань, $\mu(t)$ повертається до значення $\mu\approx0,5$.

Визначають границі між реалізаціями різних режимів динаміки сигналу, яка сформувалася, за переходом поточного значення функції через критичну позначку μ =0,5, а саме: $\mu(t)>0,5$ – стабільна динаміка сигналу, відсутні явні і приховані дефекти, розвиток яких може привести до руйнування об'єкта чи його складових частин – об'єкт не потребує керуючих втручань; $\mu \leq 0,5$ – нестаціонарна динаміка сигналу необхідні керуючі втручання.

Таким чином, реалізація запропонованого способу діагностування виробничих об'єктів здійснена при контролі буксування (нестаціонарний режим автоколивань) колісної пари залізничного тягового рухомого складу, а порівняння результатів виявлення моменту початку автоколивань штатною системою і способом діагностування виробничих об'єктів, що заявляється, виявляє збіг показників контролю при більшій точності діагностування та тій перевазі, що запропонований спосіб не потребує наявності акустичних або вібраційних паспортних даних об'єкта.

У [21] описано пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання, що містить датчики для реєстрації порушення технічного стану, передавачі і приймачі сигналів, а також блок управління та контролю, який відрізняється тим, що як датчик для реєстрації порушення технічного стану і передавач сигналів використані постійний магніт, що прикріплений до одного з елементів з'єднання, що діагностується, та електрична котушка, що знаходиться в магнітному полі постійного магніту і прикріплена до другого елемента з'єднання.

Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання [22], що містить датчики для реєстрації порушення технічного стану, передавачі і приймачі сигналів, а також блок управління та контролю, який відрізняється тим, що датчики виконано у вигляді струмопровідного дроту, виготовленого з крихкого матеріалу в крихкій ізоляційній оболонці і прикріпленого до з'єднання, що діагностується, таким чином, що один кінець датчика закріплений на одному елементі з'єднання, а другий кінець датчика – на іншому елементі з'єднання.

Пристрій безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу [18], який складається з блоків сигналізації та

блока управління і контролю, який відрізняється тим, що блоки сигналізації замінено магнітними мітками, які нанесені на колісний центр та бандаж, а також конструкцію доповнено датчиками-зчитувачами, які розташовано в кузовній частині та приєднано паралельно до блока управління й контролю.

Спосіб діагностування переддефектного стану технічного об'єкта акустичною емісією [26], який полягає у підготовці об'єкта до операції контролю на спеціальному стенді, перевірці працездатності приладів та обробці результатів, який відрізняється тим, що генерують емісійну послідовність, яку співвідносять із фрактальним алгоритмом наробітку на відмову, потім виявляють хаотичний компонент, про присутність якого свідчить наявність областей підвищеної швидкості зародження дефектів.

Спосіб контролю технічного стану конструкції в процесі експлуатації методом твердості [19], що включає операції вимірювання твердості металу конструкції на стадіях напрацювання і наступного порівнювання отриманих значень твердості з нормованим значенням твердості, що відповідає початковому стану металу конструкції, а за різницею згаданих значень судять про ступінь деградації металу, тобто про технічний стан конструкції, який відрізняється тим, що вимірювання значень твердості металу конструкції, як на стадіях напрацювання, так і у початковому стані, виконують під навантаженням при робочих рівнях напружень, а контроль технічного стану конструкції в процесі експлуатації проводять за різницею параметрів відповідних значень твердості металу.

Пристрій для діагностики стану зношеності труб [15], який містить котушку з фероосердям, вимірювальний пристрій та джерело живлення, який відрізняється тим, що містить додаткову другу котушку з фероосердям та два трансформатори струму, первинні обмотки яких послідовно з'єднані з обмотками котушок, а у вторинні обмотки яких включено резистори, з'єднані з однієї сторони між собою, а з другої сторони під'єднані до вимірювального пристрою, при цьому джерело живлення з'єднано із виходами котушок з фероосердям і паралельно їм.

Пристрій для діагностики технічного стану технологічних агрегатів [28], який містить первинні перетворювачі параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату, блок первинної обробки сигналів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату, блок фільтрів сигналів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату, блок порівняння, блок введення уставок граничних значень параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату і нормативнодовідкових даних та блок індикації та реєстрації параметрів технічного стану технологічного агрегату та його робочих вузлів, при цьому первинні перетворювачі параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату з'єднані з входом блока первинної обробки сигналів параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату, вихід якого з'єднаний з входом блока фільтрів сигналів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату, вихід блока фільтрів з'єднаний з першим входом блока порівняння, другий вхід якого з'єднаний з блоком введення уставок граничних значень параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату і нормативно-довідкових даних, вихід блока порівняння з'єднаний з першим входом блока індикації та реєстрації параметрів технічного стану технологічного агрегату та його робочих вузлів, в нього додатково введені блок вимірювання напрацювання робочими вузлами технологічного агрегату, генератор імпульсів часових інтервалів, блок визначення прогнозованого значення швидкості зміни параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату, блок визначення поточного значення швидкості і прискорення зміни параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату, блок визначення швидкості зміни параметрів технічного стану робочих вузлів технологічного агрегату залежно від їх величини і напрацювання робочими вузлами технологічного агрегату та блок визначення часу до досягнення діагностичними параметрами граничного значення.

Спосіб вібраційної діагностики машин циклічної дії [16], що полягає у вимірі вібраційних сигналів у всьому спектрі частот на різних режимах робіт і їх порівняння з пороговим рівнем, який відрізняється тим, що як пороговий рівень порівняння реєструють максимальні значення рівнів вібраційних сигналів, зокрема максимальні значення амплітуд цих сигналів у критичних станах машин при поломках і планових зупинках на ремонт. Пристрій для вібраційної діагностики машин циклічної дії, що містить віброперетворювач, блок порівняння і блок пам'яті, який відрізняється тим, що віброперетворювач з'єднаний із першим входом блока порівняння, другий вхід якого сполучений із виходом блока пам'яті збереження максимальних значень амплітуд вібросигналів, вихід блока порівняння з'єднаний із слідкуючим фільтром вібраційних сигналів, вихід останнього зв'язаний із блоком обчислення, а один із входів блока обчислення з'єднаний із блоком пам'яті.

Прохідний електромагнітний перетворювач для контролю сталевих канатів [23], що містить роз'ємний каркас з непровідного матеріалу, збуджуючу обмотку, з'єднану з джерелом змінного струму, і вимірювальну обмотку, з'єднану з вимірювальним блоком, який відрізняється тим, що каркас виконано порожнистим, а обмотки розташовано між його стінками і жорстко закріплено на одній з них. 1. Система моніторингу стану трубопроводів по вимірюваннях коерцитивної сили [24], що включає магнітометричні датчики, систему електроживлення, зв'язку, збору, обробки і зберігання даних, яка відрізняється тим, що магнітометричні датчики виконані на основі датчиків Холла для вимірювання коерцитивної сили металу трубопроводів, а система електроживлення, зв'язку, збору і зберігання даних має локальні (місцеві) підсистеми, виконані з можливістю роботи дискретно або безперервно, і центральний пульт, оснащений комп'ютерною технікою для обробки і зберігання отриманих даних і видачі інформації для оперативного керування.

2. Система моніторингу за п. 1, яка відрізняється тим, що система збору і зберігання даних виконана автоматичною і включає систему магнітометричних датчиків, встановлених на трубопроводах, лінії зв'язку датчиків з комутатором і коерцитиметром, встановленими в центральному пульті.

3. Система моніторингу за п. 1, яка відрізняється тим, що магнітометричні датчики встановлені в зоні кільцевих зварних з'єднань трубопроводів.

4. Система моніторингу за п. 1, яка відрізняється тим, що магнітометричні датчики мають місцеві накопичувачі інформації.

5. Система моніторингу за п. 1, яка відрізняється тим, що магнітометричні датчики мають рознімання для підключення обхідником вручну приладу опиту датчиків.

6. Система моніторингу за п. 1, яка відрізняється тим, що магнітометричні датчики виконані з можливістю знімання інформації безперервно автоматично або із заданим інтервалом часу – автоматично і/або вручну.

Пристрій для електромагнітного контролю стану каналів ливарної МГД установки [30], до складу якого входять: первинний датчик індукції магнітного поля, підсилювач, аналого-цифровий перетворювач, індикатор сигналу та блок живлення, який відрізняється тим, що в нього додатково введено два аналого-цифрових перетворювачі, триканальний мікропроцесорний блок вимірювання і програмного оброблення первинної інформації та спеціалізований монітор, причому датчик індукції виконано портативним і трикоординатним (3D), а його виходи по кожній з координат (X, Y, Z) підключені за допомогою гнучкого кабелю через підсилювач і аналого-цифровий перетворювач до мікропроцесорного блока, з'єднаного з монітором, які забезпечують візуалізацію змін стану каналу і їх місцеположення в процесі експлуатації МГД установки.

Пристрій безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу [17], який складається з блоків сигналізації,
блока управління й контролю, згідно з винаходом, для безконтактної передачі сигналу про порушений технічного стану колісних пар в пристрої передбачені блоки сигналізації, встановлені на колісному диску, кожен із блоків сигналізації складається з датчика для реєстрації взаємних переміщень елементів нероз'ємних з'єднань колісної пари й передатчика сигналів, а також приймачів, з'єднаних паралельно до блоку управління й контролю.

Відомий цифровий автоматичний коерцитиметр, що містить послідовно з'єднані блок управління, генератор лінійного струму та котушку Гельмгольца, послідовно сполучені ферозонд, тригер, елемент І, лічильник імпульсів та цифровий індикатор, генератор тактових імпульсів, вихід якого через дільник імпульсів з'єднаний з другим входом елемента І, другий вихід генератора лінійного струму через пороговий блок сполучений з другим входом тригера, піковий детектор, а вихід ферозонда через послідовно зв'язані піковий детектор та диференцюючий ланцюг підключений до входу блока управління, генератор змінного згасаючого струму, підключений першою контактною групою реле часу до котушки Гельмгольца, яка з генератором лінійного струму зв'язана другою контактною групою реле часу, з'єднаного з блоком управління, розташовано додатковий диференцюючий ланцюг, підключений до виходу тригера та до додаткового входу блока управління.



Рис. 3.4. Схема цифрового автоматичного коерцитиметру

Відомий цифровий автоматичний коерцитиметр [29], схема якого приведена на рис. 3.4. Він містить котушку Гельмгольца 1, генератор 2 лінійного струму, блок 3 управління, пороговий блок 4, елемент I 5, лічильник 6 імпульсів, цифровий індикатор 7, тригер 8, ферозонд 9, піковий детектор 10, основний диференцюючий ланцюг 11, генератор 12 тактових імпульсів, дільник 13 імпульсів, виріб 14, генератор 15 змінного згасаючого струму, реле часу 16 з двома контактними групами (не показані) та додатковий диференцюючий ланцюг 17.

На рис. 3.5 наведена часова діаграма роботи цифрового автоматичного коерцитиметра.



Рис. 3.5. Часова діаграма роботи коерцитиметра

Цифровий автоматичний коерцитиметр працює наступним чином. Після установки виробу 14 в котушку Гельмгольца 1 блоком 3 управління запускається реле часу 16, яке своєю першою контактною групою підключає до котушки Гельмгольца 1 генератор 15 змінного згасаючого струму (проміжок 0-0' діаграми *i*, рис. 3.5), під впливом якого виріб 14 розмагнічується. Потім реле часу 15 своєю першою контактною групою відключає котушку Гельмгольца 1 від генератора 15 змінного згасаючого струму, а другою контактною групою підключає котушку Гельмгольца 1 до генератора 2 лінійного струму і в котушку Гельмгольца 1 подається струм, який лінійно зростає (проміжок 0'-*а* діаграми *i*, рис. 3.5), у результаті чого намагнічується виріб 14 і водночас збільшується сигнал на виході ферозонда 9. При досягненні насичення виробу 14, що відповідає струму I_{S1} (точка *a*, рис. 3.5), сигнал з вихідної обмотки ферозонда 9 сягає максимального значення і через піковий детектор 10 та основний диференцюючий ланцюг 11 поступає у блок 3 управління, який впливає на генератор 2 лінійного струму. По цій команді струм зменшується до нуля (точка б, рис. 3.5) та в момент переходу струму через нуль відбувається зміна його полярності. У котушку Гельмгольца 1 подається лінійний струм зворотної полярності, який перемагнічує виріб 14. У момент, коли струм дорівнює нулю, пороговим блоком 4 вмикається тригер 8, який підключає по першому входу елемент І 5, при цьому імпульси, які виробляються генератором 12 тактових імпульсів, через дільник 13 імпульсів та другий вхід елемента І 5 поступають на лічильник 6 імпульсів. Зі зростанням струму відбувається розмагнічування виробу 14 і в момент рівності величини напруженості магнітного поля, наведеного в котушці Гельмгольца 1, коерцитивній силі H_{C1} виробу 14, що відповідає значенню струму I_{Hc1} (точка в, рис. 3.5), сигнал на виході ферозонда 9 зменшується до нуля та відбувається перекидання тригера 8. Закривається елемент І 5 та припиняється надходження імпульсів з генератора 12 тактових імпульсів через дільник 13 імпульсів, який зменшує кількість вироблених імпульсів удвічі, на лічильник 6 імпульсів, при цьому встановлюється кількість імпульсів N₁/2, пропорційна половині величини коерцитивної сили *H*_{C1}/2. У цей момент сигнал з виходу тригера 8 через додатковий диференцюючий ланцюг 17 подається на додатковий вхід блока 3 управління, який вимикає струм в котушці Гельмгольца 1 (точка в, рис. 3.5) та знову вмикає генератор 2 лінійного струму, який виробляє лінійний струм протилежної полярності, який починає змінюватися з нуля (точка г, рис. 3.5) за лінійним законом до I_{S2} (точка д, рис. 3.5), при цьому відбувається намагнічування виробу 14 і в точці д (рис. 3.5) він намагнічується до насичення у зворотному напрямку, що відповідає збільшенню вихідного сигналу ферозонда 9 до максимуму. Під дією цього сигналу через піковий детектор 10 та основний диференцюючий ланцюг 11 блок 3 управління впливає на генератор 2 лінійного струму. По цій команді струм знову зменшується до нуля (точка е, рис. 3.5) та в момент переходу струму через нуль блок 3 управління міняє напрям струму генератора 2 лінійного струму на зворотний. У момент, коли струм дорівнює нулю, пороговим блоком 4 вмикається тригер 8, який підключає по першому входу елемент I 5, при цьому імпульси, які виробляються генератором 12 тактових імпульсів, через дільник 13 імпульсів та другий вхід елемента І 5 поступають на лічильник 6 імпульсів. Зі зростанням струму знову відбувається перемагнічування виробу 14 і в момент рівності магнітного поля котушки Гельмгольца 1 коерцитивній силі H_{C2} виробу 14, що відповідає значенню струму I_{Hc2} (точка \mathcal{H}_{C2} рис. 3.5), на виході ферозонда 9 з'являється нуль, що спричиняє перекидання тригера 8. Закривається елемент І 5 та припиняється надходження імпульсів з генератора 12 тактових імпульсів через дільник 13 імпульсів на лічильник 6 імпульсів, при цьому до кількості імпульсів $N_1/2$, зареєстрованої ним при першому ліченні, пропорційній значенню $H_{C1}/2$, додається кількість імпульсів $N_2/2$, пропорційна значенню $H_{C2}/2$, і на цифровий індикатор 7 подається $N_1/2 + N_2/2 = N$ імпульсів, що відповідає коерцитивній силі $H_{C1}/2 + H_{C2}/2 = H_c$ виробу 14. Вимірювання коерцитивної сили при двох напрямках лінійного струму дозволяє підвищити точність цифрового автоматичного коерцитиметра за рахунок компенсації впливу зовнішніх магнітних полів перешкод.

Відомий пристрій для визначення механічних напружень у феромагнітних конструкціях [25], схема якого наведена на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Схема пристрою для визначення механічних напружень у феромагнітних конструкціях

Пристрій містить магнітопружний датчик 2 з магнітною головкою запису 3, на кожному з полюсних наконечників незамкненого магнітопроводу якої розташовано обмотку 4 та які виконано з наскрізними отворами, де розташовано по дві обмотки 5, обмотки збудження 6 на них, додаткові магнітопроводи 7 з обмотками 8, закріплені до магнітопроводу 3 через немагнітні прокладки 9, джерело 10 живлення постійного струму, згладжуючий фільтр 11, сполучений виходом з обмотками 6 та 8, реле часу 12 з контактною групою і двома регулювальними ланцюгами (не показані), блок 13 вимірювання і сигналізації, сполучений з обмотками 4, з однощілинною потокочутливою головкою зчитування 14, яка вимірює горизонтальну складову напруженості магнітного поля намагніченої ділянки з протилежного боку феромагнітної конструкції 1, та з парою контактів контактної групи реле часу 12.

На рис. 3.7 показано розподіл уздовж осі x горизонтальних складових напруженості зовнішнього магнітного поля у феромагнітній конструкції основного магнітопроводу 3 (епюра H_{y3} , рис. 3.7), додаткових магнітопроводів 7 (епюри H_{y7} , рис. 3.7) та результуючої напруженості магнітного поля (епюра H_{y5} , рис. 3.7) основного 3 та додаткових 7 магнітопроводів. Завдяки застосуванню двох додаткових магнітопроводів 7 з обмотками 8 результуюча напруженість магнітного поля має високу крутість (епюра H_{y5} , рис. 3.7), і тому забезпечується доведення локальної ділянки феромагнітної конструкції 1 в місці вимірювання до стану магнітного насичення.



Рис. 3.7. Горизонтальні складові напруженості зовнішнього магнітного поля у феромагнітній конструкції

Пристрій працює наступним чином. Магнітопружний датчик 2 встановлюється в місці вимірювання механічних напружень. Запускається реле часу 12, яке своєю контактною групою підключає обмотки збудження 6 та 8 через згладжуючий фільтр 11 до джерела 10 живлення постійного струму. Під впливом імпульсного магнітного поля ділянка феромагнітної конструкції 1 у місці вимірювання переходить до стану магнітного насичення, а після закінчення магнітної дії на неї – до стану залишкової намагніченості. На цей час реле часу 12 відключає вхід згладжуючого фільтра 11 від джерела 10 живлення постійного струму і через невеликий інтервал часу пілключає блок 13 вимірювання та сигналізації. У момент прикладання до феромагнітної конструкції 1 навантаження змінюється напружений стан матеріалу в місці вимірювання, що призводить до зміни точки на граничній петлі гістерезису, що відповідає зменшенню напруженості поля на величину, пропорційну діючим механічним напруженням. Кожна з пар додаткових обмоток 5 відіграє роль модулятора магнітного потоку, який замикається магнітопроводом магнітної головки запису 3. Вимірювальні сигнали з послідовно з'єднаних обмоток 4 та з однощілинної потокочутливої головки зчитування 14, що у сумі відповідають напруженості магнітного поля залишкової намагніченості ділянки феромагнітної конструкції 1, подаються у блок 13 вимірювання та сигналізації, який за різницею величин напруженості магнітного поля до і після механічної дії визначає величину прикладеного механічного навантаження



Рис. 3.8. Блок-схема підключення інтегральної мікросхеми HMC5883L та мікропроцессора

Для вимірювання індукції магнітного поля на поверхні металевого виробу можна використовувати зокрема, магніторезистивні датчики, виконані у вигляді інтегральних мікросхем, наприклад, мікросхеми HMC5883L. Вона має три магніторезистивні мости; 12-розрядний АЦП та двохпровідний послідовний інтерфейс передачі даних I2C. Напруга живлення від 2,16 до 3,6 В, діапазон вимірюваної індукції від –8 до +8 Гс з кроком 2 мГс. Лінійність індукції в діапазоні –2...+2 Гс дорівнює 0,1%. Магніторезистивні мости розташовані у трьох площинах.

Одне із можливих схемних рішень щодо використання мікросхеми НМС5883L при діагностуванні технічного стану сталевих металоконструкцій наведено на рис. 3.8.

Більш докладно використання HMC5883L буде розглянуто у наступних розділах.

3.2. Рішення з використанням індуктивних датчиків для магнітометричної оцінки залишкового ресурсу металоконструкцій

Суть магнітометричного методу полягає в тому, що у відповідному пристрої для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних елементів з'єднань на одному з елементів з'єднання закріплений постійний магніт, а на іншому елементі з'єднання розташовано ферозондові магнітометри або ферозондові градієнтометри, які знаходиться в магнітному полі постійного магніту та виробляють інформаційні сигнали щодо відсутності або можливого взаємного переміщення елементів з'єднання.

Пристрої діагностики можуть бути побудованими на основі магнітних систем різного принципу створення інформаційного магнітного поля. Можуть використовуватися постійні магніти різноманітної геометрії: стрижневі прямокутні, циліндричні, кільцеві, С-подібні, а також магнітні мітки, нанесені на сталеві конструкції, які підлягають діагностиці їхнього технічного стану. Серед джерел інформаційного магнітного поля, які створюються постійними магнітами, особливий інтерес представляють Сподібні та стрижневі прямокутні постійні магніти, що відзначаються значними величинами напруженості зовнішнього поля та стабільністю характеристик, а також технологічністю їхнього застосування у зазначених пристроях.

3.2.1. Магнітна система у вигляді С-подібного постійного магніту

Актуальним є аналіз математичної моделі поля С-подібного магніту із прямокутним перерізом полюсів. Отримані аналітичні вирази складових напруженості в міжполюсному просторі С-подібного магніту як джерела інформаційного поля слугують основою для оптимального розміщення ферозондових чутливих елементів.

Для аналізу поля в міжполюсному просторі С-подібного магніту із прямокутним перерізом полюсів приймемо ширину проміжку 2d та товщину полюсу 2Δ . Крім того, з високою для практики точністю, можна вважати, що магніт виконано з ізотропного матеріалу з постійною відносною магнітною проникністю μ_h , а поле – пласкопаралельне. Ідеалізована двохмірна модель С-подібного магніту із прямокутним перерізом полюсів зображена на рис. 3.9. Уважаємо, що магнітне поле створюється постійною за величиною та по всьому тілу магніту однаковою залишковою намагніченістю $\overline{M_0}$, вектор якої направлений уздовж осі *у*.

Для аналізу зовнішнього поля магніту використано метод, викладений у [8]. Нехай залишкова намагніченість осердя магніту дорівнює

$$\vec{M}_0(x) = \vec{j}M_{0m}p_{\Delta}(x), \qquad (3.5)$$

де *M*_{0m} – амплітудне значення залишкової намагніченості,

$$p_{\Delta}(x) = \begin{cases} 1, & \text{при} |x| \le \Delta \\ 0, & \text{при} |x| > \Delta. \end{cases}$$

Розкладення $\vec{M}_0(x)$ в інтеграл Фур'є запишеться у виді

$$\vec{M}_0(x) = \vec{j}M_{0m} \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \Delta\omega}{\omega} \cos x \,\omega d\omega \,. \tag{3.6}$$

Для довільної гармонічної складової просторового спектра ω=Ω≠0.

$$\vec{M}_{0\Omega} = \vec{j}M_{m\Omega}\cos\Omega x\,, \qquad (3.7)$$

де $M_{m\Omega} = \frac{2}{\pi} M_{0m} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega}$ – амплітуда намагніченості гармоніки частоти Ω , вирішується гранична задача (рис. 3.10).



Рис. 3.9. Ідеалізована двохмірна модель С-подібного магніту із прямокутним перерізом полюсів



Рис. 3.10. Ідеалізована двохмірна модель гармонічної складової просторового спектра намагніченості

Диференціальне рівняння відносно скалярного потенціалу магнітного поля має вид

$$\Delta \varphi_{k \Omega} = \begin{cases} \frac{di \nu \vec{M}_0 \Omega}{\mu_h} = -\frac{\Omega M_m \Omega}{\mu_h} \sin \Omega x}{0 \text{ при } k = 2} \text{ при } k = 1,3 \end{cases}$$
(3.8)

Рішення рівняння (3.8) запишеться у виді [35]

$$\begin{cases} \varphi_{1\Omega} = A_1 e^{\Omega y} \cos \Omega x \\ \varphi_{2\Omega} = (A_2 e^{\Omega y} + B_2 e^{-\Omega y}) \cos \Omega x \\ \varphi_{3\Omega} = A_3 e^{-\Omega y} \cos \Omega x \end{cases}$$
(3.9)

Воно має задовольняти граничним умовам на кожній із двох границь

$$\varphi_n = \varphi_{n+1}; \mu_n \frac{\partial \varphi_n}{\partial y} - M_{0yn} = \mu_{n+1} \frac{\partial \varphi_{n+1}}{\partial y} - M_{0y(n+1)}.$$
(3.10)

Вирази для постійних інтегрування визначаються підстановкою (3.8) у (3.10). Після визначення скалярного потенціалу магнітного поля в області 2, що відповідає гармоніці частоти $\omega = \Omega$, знаходять потенціал, викликаний всіма складовими спектра вихідної намагніченості, згідно з виразом

$$\begin{split} \varphi_{2} &= \frac{2}{\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_{h} + 1} \Big[\int_{0}^{\infty} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} e^{-(-y+d+4d\alpha)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega - \\ &- \frac{\mu_{h} - 1}{\mu_{h} + 1} \int_{0}^{\infty} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} e^{-(-y+3d+4d\alpha)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega + \\ &+ \int_{0}^{\infty} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} e^{-(y+d+4d\alpha)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega + \\ &+ \frac{\mu_{h} - 1}{\mu_{h} + 1} \int_{0}^{\infty} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} e^{-(y+3d+4d\alpha)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega \Big], \end{split}$$
(3.11)

$$\exists e \ r = \left(\frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1}\right)^2.$$

Зводячи інтеграли до табличних та враховуючи співвідношення $\vec{H} = -grad \, \varphi$, отримуємо аналітичні вирази для горизонтальної та вертикальної складових напруженості поля у проміжку С-подібного постійного магніту

$$H_{2x} = \frac{1}{2\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_h + 1} \left[-\sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(-y + d + 4d\alpha)^2 + (x + \Delta)^2}{(-y + d + 4d\alpha)^2 + (x - \Delta)^2} - \frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(-y + 3d + 4d\alpha)^2 + (x + \Delta)^2}{(-y + 3d + 4d\alpha)^{\alpha} + (x - \Delta)^2} + \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(y + d\alpha + 4d\alpha)^2 + (x + \Delta)^2}{(y + d\alpha + 4d\alpha)^2 + (x - \Delta)^2} + \frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \ln \frac{(y + 3d + 4d\alpha)^2 + (x + \Delta)^2}{(y + 3d + 4d\alpha)^2 + (x - \Delta)^2} \right];$$
(3.12)

$$H_{2y} = \frac{1}{\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_h + 1} \left[\sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left(\arctan g \frac{x + \Delta}{-y + d + 4d\alpha} - \arctan g \frac{x - \Delta}{-y + d + 4d\alpha} \right) + \frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left(\arctan g \frac{x + \Delta}{-y + 3d + 4d\alpha} - \arctan g \frac{x - \Delta}{-y + 3d + 4d\alpha} \right) + \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left(\arctan g \frac{x + \Delta}{y + d + 4d\alpha} - \arctan g \frac{x - \Delta}{y + d + 4d\alpha} \right) + \frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} r^{\alpha} \left(\arctan g \frac{x + \Delta}{y + 3d + 4d\alpha} - \operatorname{arctg} \frac{x - \Delta}{y + 3d + 4d\alpha} \right) \right] .$$

$$(3.13)$$

Розрахункові криві горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{2x} при різних відстанях у частках Δ від поверхні полюсів трьох типорозмірів ($d=3\Delta$; $d=\Delta$; $d=\Delta/3$) С-подібних магнітів для значень $\mu_h = 1000$ та $M_{0m} = 10^4$ А/м надані на рис. 3.11.

Як видно з рис. 3.11, криві горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{2x} мають лінійні ділянки, що можуть слугувати інформаційним магнітним полем для визначення відповідного взаємного переміщення елементів з'єднання при використанні точкових чутливих елементів, наприклад, ферозондів. Отримані аналітичні вирази є основою

для находження максимальної довжини лінійної ділянки *H*_{2x} при заданому коефіцієнті нелінійності є₃.



Рис. 3.11. Криві горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{2x} при різних відстанях від полюсів різноманітних С-образних магнітів: 1) 0,25 Δ ; 2) 0,5 Δ ; 3) 0,75 Δ

Найбільший діапазон лінійності при достатньо значній величині горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{2x} спостерігається при геометрії С-подібного постійного магніту з розмірами $d=\Delta/3$ на відстані у = ±0,75 Δ від центра повітряного проміжку.

Принцип побудови пристрою для безперервної діагностики елементів з'єднань на базі магнітної системи у вигляді С-подібного постійного магніту та ферозондових датчиків зображений на рис.3.12. С-подібний постійний магніт прикріпляється до одного елемента з'єднання, а два мініатюрних ферозонди ФЗ1 та ФЗ2 розташовані на іншому елементі з'єднання в міжполюсному просторі С-подібного постійного магніту на однаковій відстані від осі симетрії міжполюсного проміжку. Їхні виходи зв'язані з віднімачем «–», з'єднаного з аналого-цифровим перетворювачем АЦП, вихід якого підключений до блока контролю. Перевагою запропонованої побудови пристрою є те, що, по-перше, результуючий вихідний (інформаційний) сигнал удвічі більший та, по-друге, значно знижується похибка вимірювання в умовах можливих поперечних коливань ферозондів.



Рис. 3.12. Схема пристрою для безперервної діагностики елементів з'єднань на базі С-подібного постійного магніту

Таким чином, на основі отриманих аналітичних виразів напруженості зовнішнього поля С-подібного постійного магніту із прямокутним перерізом полюсів установлено, що на кривих розподілення горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{2x} виділяються ділянки, де має місце практично лінійна зміна достатньо значної величини напруженості магнітного поля.

3.2.2 Магнітна система у вигляді стрижневого прямокутного постійного магніту

Актуальним є знаходження аналітичних виразів складових напруженості просторового зовнішнього поля біля торця стрижневого прямокутного постійного магніту з подальшим визначенням діапазонів лінійности датчика у залежності від взаємного розташування магніту з урахуванням його геометрії та ферозондових чутливих елементів.

Для аналізу зовнішнього поля стрижневого прямокутного постійного магніту приймемо його довжину h та товщину полюса 2 Δ . Крім того, вважаємо, що магніт виконаний із ізотропного матеріалу з відносною постійною магнітною проникністю μ_h . Ідеалізована двохмірна модель стрижневого прямокутного постійного магніту та ферозонда ФЗ зображена на рис. 3.13.



Рис. 3.13. Ідеалізована двохмірна модель стрижневого прямокутного постійного магніту

Вважаємо, що стрижневий прямокутний постійний магніт закріплений на одному з елементів з'єлнань конструкції, а мініатюрний ферозонд ФЗ розміщений на іншому елементі з'єднань у зоні торця стрижневого прямокутного постійного магніту паралельно його поверхні та може взаємно переміщуватися вздовж осі х. Вважаємо також, що магнітне поле створюється постійною за величиною по всьому тілу магніту залишковою намагніченістю \vec{M}_0 , вектор якої направлений уздовж осі у.

Як і раніше для аналізу зовнішнього поля стрижневого прямокутного постійного магніту використано метод, викладений у [8]. Нехай залишкова намагніченість стрижневого прямокутного постійного магніту дорівнює

$$\overline{M}_0(x) = \overline{j}M_{0m}p_{\Delta}(x), \qquad (3.14)$$

де M_{0m} – амплітудне значення залишкової намагніченості,

 $p_{\Delta}(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } |x| \leq \Delta \\ 0, & \text{при } |x| > \Delta. \end{cases}$

Для довільної гармонічної складової просторового спектру $\omega = \Omega \neq 0$

$$\vec{M}_{0\Omega} = \vec{j}M_{m\Omega}\cos\Omega x\,,\qquad(3.15)$$

де $M_{m\Omega} = \frac{2}{\pi} M_{0m} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega}$ – амплітуда намагніченості гармоніки частоти

 Ω , вирішується гранична задача (рис. 3.14).



Рис. 3.14. Ідеалізована двохмірна модель гармонічної складової просторового спектра намагніченості

Диференціальне рівняння відносно скалярного потенціалу магнітного поля має вид

$$\Delta \varphi_{k\Omega} = \begin{cases} \frac{div \, \overrightarrow{M}_{r\Omega}}{\mu_r} = -\frac{\Omega M_{rm\Omega} \sin \Omega x}{\mu_r} & npu \quad k = 2\\ 0 & npu \quad k = 1, 3 \end{cases}$$
(3.16)

Рішення рівняння (3.16) запишеться таким чином [35]

$$\begin{cases} \varphi_{1\Omega} = A_1 e^{\Omega y} \cos \Omega x \\ \varphi_{2\Omega} = (A_2 e^{\Omega y} + B_2 e^{-\Omega y}) \cos \Omega x \\ \varphi_{3\Omega} = A_3 e^{-\Omega y} \cos \Omega x \end{cases}$$
(3.17)

Воно має задовольняти граничним умовам на кожній із двох границь

$$\varphi_n = \varphi_{n+1};$$

$$\mu_n \frac{\partial \varphi_n}{\partial y} - M_{ryn} = \mu_{n+1} \frac{\partial \varphi_{n+1}}{\partial y} - M_{ry(n+1)}.$$
 (3.18)

Вирази для постійних інтегрування визначаються підстановкою (3.17) у (3.18). Постійна інтегрування для області 3, де розташований ферозонд Ф3, дорівнює

$$A_{3} = \frac{M_{0\Omega}}{\Omega} \frac{1}{(\mu_{h}+1)[1-(\frac{\mu_{h}-1}{\mu_{h}+1})^{2}e^{-2h\Omega}]} (1-\frac{2\mu_{h}}{2\mu_{h}+1}e^{-h\Omega} + \frac{\mu_{h}-1}{\mu_{h}+1}e^{-2h\Omega}).$$
(3.19)

Після перетворення вираз (3.19) має вид

$$A_{3} = \frac{M_{0\Omega}}{\Omega} \frac{1}{\mu_{h}+1} \left(1 - \frac{2\mu_{h}}{\mu_{h}+1}\right)^{2} e^{-h\Omega} + \frac{\mu_{h}-1}{\mu_{h}+1} e^{-2h\Omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} \left(\frac{\mu_{h}-1}{\mu_{h}+1}\right)^{2\alpha} e^{-2h\alpha\Omega}.$$
(3.20)

Підставляючи (3.20) в (3.17), знайдемо скалярний потенціал магнітного поля в області 3, що відповідає відповідній гармоніці частоти $\omega = \Omega$. Потенціал, визваний усіма складовими спектра вихідної намагніченості, визначається згідно з виразом

$$\varphi_{3} = \frac{2}{\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_{h}+1} \left[\int_{0}^{\infty} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} e^{-(y+2h\alpha)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega - \frac{2\mu_{h}}{\mu_{h}+1} \int_{0}^{\infty} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} e^{-(y+2h\alpha+h)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega + \frac{\mu_{h}-1}{\mu_{h}+1} \int_{0}^{\infty} \frac{\sin \Delta \omega}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} e^{-(y+2h\alpha+2h)\omega} \frac{\cos x\omega}{\omega} d\omega \right],$$

$$(3.21)$$

де $m = (\frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1})^2$.

Зводячи інтеграли до табличних та враховуючи співвідношення $\vec{H} = -grad \, \varphi$, отримуємо аналітичні вирази для горизонтальної та вертикальної складових напруженості поля з боку полюса стрижневого прямокутного постійного магніту

$$H_{3x} = \frac{1}{2\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_h + 1} \Big[\sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \ln \frac{(y + 2h\alpha)^2 + (x + \Delta)^2}{(y + 2h\alpha)^2 + (x - \Delta)^2} - \frac{2\mu_h}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \ln \frac{(y + 2h\alpha + h)^2 + (x + \Delta)^2}{(y + 2h\alpha + h)^2 + (x - \Delta)^2} + (3.22) + \frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \ln \frac{(y + 2h\alpha + 2h)^2 + (x + \Delta)^2}{(y + 2h\alpha + 2h)^2 + (x - \Delta)^2} \Big] \quad \partial \mathfrak{I}\mathfrak{R} \quad x \ge 0 ;$$

$$H_{3y} = \frac{1}{\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_h + 1} \Big[\sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} (\operatorname{arctg} \frac{x + \Delta}{y + 2h\alpha} - \operatorname{arctg} \frac{x - \Delta}{y + 2h\alpha}) - \frac{2\mu_h}{\mu_h + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} (\operatorname{arctg} \frac{x + \Delta}{y + 2h\alpha + h} - \operatorname{arctg} \frac{x - \Delta}{y + 2h\alpha + h}) + (3.23)$$

$$+\frac{\mu_h-1}{\mu_h+1}\sum_{\alpha=0}^{\infty}m^{\alpha}(\arctan\frac{x+\Delta}{y+2h\alpha+2h}-\arctan\frac{x-\Delta}{y+2h\alpha+2h})].$$

При $h \to \infty$ вирази (3.22) та (3.23) приймають відомий вид

$$H_{x} = \frac{1}{2\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_{h} + 1} \ln \frac{y^{2} + (x + \Delta)^{2}}{y^{2} + (x - \Delta)^{2}} \quad \partial n \pi \quad x \ge 0 \quad ; \tag{3.24}$$

$$H_{y} = \frac{1}{\pi} \frac{M_{0m}}{\mu_{h} + 1} \left(\operatorname{arctg} \frac{x + \Delta}{y} - \operatorname{arctg} \frac{x - \Delta}{y} \right) . \tag{3.25}$$

Слід відмітити, що вирази (3.24) та (3.25) являються відповідно вертикальною та горизонтальною компонентами напруженості магнітного поля ідеалізованої кільцеподібної головки запису з прямокутною формою робочого зазору шириною 2Δ , що свідчить про дуальність зазначених магнітних систем.

Розрахункові криві горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{3x} при різних відстанях у долях Δ від поверхні полюса стрижневого прямокутного постійного магніту для значень $h = 4\Delta$, $\mu_h = 1000$, $M_{0m} = 10^4 A / M$ представлені на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Криві горизонтальної складової напруженості поля H_{3x} при різних відстанях у долях Δ від поверхні полюса стрижневого прямокутного постійного магніту

Для розрахунку числових значень горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{3x} у діапазоні лінійності при заданому коефіцієнті нелінійності ε_3 у залежності від відстані до поверхні полюса стрижневого прямокутного постійного магніту було розроблено алгоритм та реалізована відповідна комп'ютерна програма.

Алгоритм знахождення максимальної довжини лінійної дільниці H_{3x} полягає в наступному: при фіксованому початковому значенні координати y_n на кожному кроці зміни x розраховується поточне значення коефіцієнта є та порівнюється із заданим ε_3 . Якщо $\varepsilon < \varepsilon_3$, то координата x отримує приріст Δx та знову відбувається порівняння ε з ε_3 . У разі, коли $\varepsilon \geq \varepsilon_3$, запам'ятовуються та виводяться значення локального максимуму довжини лінійної ділянки $2x_{\Delta}$ та величина горизонтальної складової напруженості магнітного поля на границі інтервала лінійності $H_{3x\Delta}$. Потім координата y отримує приріст Δy і процедура обчислення $2x_{\Delta}$ повторюється. У подальшому із масива локальних максимумів вибирається максимум максимумом діапазону лінійності $2x_{\Delta m}$.

За отриманими результатами лічення для приняйтого $\varepsilon_3 = 0,01$ на рис. 3.16 зображена залежність приведеної довжини лінійної ділянки $2x_{\Delta}/\Delta$ від відстані до поверхні полюса магніту. Із кривої видно, що максимальний діапазон лінійності дорівнює $2x_{\Delta}/\Delta=1,68$ при відстані між чутливим елементом та магнітом 0,41 Δ . При цьому $H_{3x\Delta} = 415$ А/м.



Рис. 3.16. Залежність діапазона лінійності 2*x*_Δ від відстані до поверхні полюса стрижневого прямокутного постійного магніту

Проведені експерименти щодо вимірювання зовнішнього поля стрижневого прямокутного постійного магніту з розмірами 20×10×20 мм³ адекватно відобразили характер зміни горизонтальної складової напруженості магнітного поля H_{3x} та порядок її величини з похибкою, що не перевищує 3...5%.

3.3. Методика розрахунку ланцюга намагнічування пари «магнітна головка-профільний носій» при створенні інформаційних джерел для систем діагностики

При розробці пристроїв для безперервного діагностування технічного стану сталевих конструкцій ефективно зарекомендували себе засоби відбору первинної інформації, в яких ферочутливі перетворювачі взаємодіють з магнітним полем міток, нанесених головками магнітного запису.

Для досягнення високої локальності та стійкості магнітної мітки, нанесеної на профільну сталеву конструкцію методом поперечного запису [14] необхідно виготовляти магнітопровід головки запису із високоякісних матеріалів з найменшими габаритними розмірами, але такими, що забезпечують повне промагнічування ділянки носія по всій товщині при значенні індукції в магнітопроводі, близькому до індукції насичення. Така вимога зумовлена тим, що сталеві конструкції, як правило, знаходяться у навантаженому стані.

Ця обставина зумовлює необхідність модифікації методики розрахунку магнітних ланцюгів, у яких одним із її елементів, а саме у товщі ділянки профільного носія має місце значне розсіювання магнітного потоку, викликане процесом магнітного запису.

Тому доцільно розрахувати ланцюг намагнічування за допомогою розробки еквівалентної електричної схеми-аналога ланцюга намагнічування пари «магнітна головка-профільний носій» з урахуванням дзвіноподібного розподілу індукції магнітного поля мітки у товщі профільного носія, нанесеної головкою для поперечного запису.

На рис. 3.17 зображена Г-подібна магнітна головка для поперечного запису на профільний прямокутний носій. Вона містить два стрижні 1 з котушками 2, перемичку 3, що з'єднує стрижні, та полює 4, виконаний виступаючим з одного боку профільного носія. Приведена конструкція магнітної головки забезпечує нанесення локальної мітки та достатнє промагнічування з мінімальними енерговитратами.

Дослідження теоретичних та експериментальних кривих розподілу поля в товщі профільного носія показали, що залежність магнітної індукції в товщі носія, дотичної до середньої лінії магнітного ланцюга $\vec{B}_{p1}(\vec{x})$



Рис. 3.17. Магнітна головка для поперечного запису на профільний носій: 1 – стрижні; 2 – котушки; 3 – перемичка; 4 – полюс

(рис. 3.17) вздовж носія при найбільш раціональному співвідношенні ширини робочого зазору L до товщини полюса $2\Delta \cdot 0,45:1$ з достатньої для практики точністю апроксимуємо виразом

$$B_{p1}(\bar{x}) = B_{p1m} \frac{1}{1 + \bar{x}^{2,72}},$$
(3.26)

де B_{p1m} – амплітудне значення магнітної індукції в центрі мітки, усере-

днене по її довжині поперек носія;

 $\overline{x} = x / \Delta$ – відносна відстань уздовж носія.

Величина B_{p1m} доводиться до такого значення, яке при вимиканні струму запису забезпечує зміну магнітної індукції ділянки носія граничній петлі гістерезису. Для типових сталевих конструкцій $B_{p1m} > 1,55$ T.

При таких умовах коефіцієнт бокового випинання поля готовки для поперечного запису становить

$$k_{gun} = \frac{\lambda}{2\Delta} = 2...4, \qquad (3.27)$$

Де λ – протяжність поля запису вздовж носія, яка визначається на рівні 0,1 від амплітуди розподілу магнітної індукції в товщі носія (рис. 3.18).



Рис. 3.18. Залежність поперечної складової індукції у профільному носії $B_{p1}(\bar{x})$

У момент подачі імпульсу струму запису пара «магнітна головкапрофільний носій» утворює замкнутий ланцюг, спрощена еквівалентна електрична схема-аналог якої наведена на рис. 3.19.

Падіння магнітної напруги в носії визначається згідно з виразом

$$U_{p} = \Phi_{p1}R_{p1} = \Phi_{p2}R_{p2} = B_{p1m}\frac{l_{p}}{\mu_{p1}\mu_{0}},$$
(3.28)

де Φ_{p1} – магнітний потік у профільному носії, обумовлений поперечною складовою магнітної індукції $B_{p1}(\bar{x})$;

 R_{p1} – магнітний опір потоку Φ_{p1} ;

Ф_{р2} - магнітний потік в профільному носії, обумовлений поздовжньою складовою магнітної індукції $B_{p2}(\bar{x})$;

 R_{p2} – магнітний опір потоку Φ_{p2} ; $l_p \approx L + c_-$ довжина магнітної мітки у профільному носії;

 B_{p1m} .



Рис. 3.19. Еквівалентна електрична схема-аналог ланцюга намагнічування пари «магнітна головка - профільний носій»

Магнітний потік Φ_{p1} знаходиться із виразу

$$\Phi_{p1} = 2\Delta c \int_{0}^{\infty} B_{p1}(\bar{x}) d\bar{x} = 1,05 B_{p1m} S_{\Gamma 3} = B_{p1} S_{\Gamma 3}, \qquad (3.29)$$

де $S_{\Gamma 3} = 2\Delta c$ – площа перерізу магнітопроводу;

В_{p1} = 1,05 В_{p1m} – магнітна індукція в області дотику головки запису та профільного носія, яка вважається постійною по перерізу полюсу.

Як показали дослідження поля запису, магнітний потік Φ_{p2} приблизно у 9 разів менше, ніж потік Φ_{p1} . Таким чином, результуючий магнітний потік в профільному носії дорівнює $\Phi_p=1,1$ Φ_{p1} ; він досягається підвищенням магнітної індукції у контактуючій області до значення $B_p=1,1$ B_{p1} (рис. 3.18).

Після визначення магнітного опору потоку Φ_{p1} , яке дорівнює $R_{p1} = \frac{l_p}{\mu_{p1}\mu_0}$, де μ_{p1} – відносна магнітна проникність профільного но-

сія при магнітній індукції $B_{p1}(\bar{x})$, та враховуючи співвідношення $R_{p2}=9$ R_{p1} , знаходимо загальний магнітний опір ділянки профільного носія

$$R_{p} = \frac{R_{p1}R_{p2}}{R_{p1} + R_{p2}} = 0.9R_{p1}.$$
(3.30)

Потік у перехідних ділянках, що характеризує область контактуючих поверхонь магнітопроводу головки запису з профільним носієм, вважаємо таким, що дорівнює Φ_p . Падіння магнітної напруги на цих ділянках при рівних зазорах δ дорівнює

$$U_{\delta} = \Phi_p R_{\delta} = 8 \cdot 10^5 B_p 2\delta, \qquad (3.31)$$

де R_{δ} – магнітний опір перехідних ділянок.

Падіння магнітного потенціалу у полюсі 4 запишемо у вигляді

$$U_n = \Phi_p R_n = B_p \frac{l_{\pi}}{\mu_{\Gamma 31} \mu_0},$$
 (3.32)

де R_n – магнітний опір полюсу; $l_n = c$;

*μ*_{ГЗ1} – відносна магнітна проникність матеріалу профільного носія при магнітній індукції, що дорівнює *B_p*.

Згідно з рис. 3.19 маємо

$$\Phi_{nep} + \Phi_2 = \Phi_{\Gamma 3} = \Phi_p + \Phi_1, \tag{3.33}$$

- де Φ_{nep} магнітний потік у перемичці головки запису;
 - Ф₁ магнітний потік розсіювання, що шунтує профільний носій, перехідні ділянки та полюс;
 - Φ_2 магнітний потік розсіювання, що шунтує перемичку;
 - Φ_{I3} магнітний потік у стрижні головки запису.

Оскільки відношення магнітних потоків Φ_{p_1} та Φ_1 зворотно пропорційно магнітним опорам $R_p + R_{\delta} + R_n$ і R_{F_1} , то

$$\Phi_1 = \Phi_p \, \frac{R_p + R_\delta + R_{\pi}}{R_{F1}},\tag{3.34}$$

де R_{F1} – магнітний опір потоку Φ_{I} .

На основі (3.33) та (3.34) магнітний потік у стрижнях магнітної готовки дорівнює

$$\Phi_{I3} = \Phi_p \left(1 + \frac{R_p + R_\delta + R_{\pi}}{R_{F1}} \right).$$
(3.35)

Оскільки співвідношення потоків Φ_{nep} та Φ_2 зворотно пропорційно магнітним опорам R_{nep} та R_{F2} , то

$$\Phi_2 = \Phi_{nep} \; \frac{R_{nep}}{R_{F2}},\tag{3.36}$$

де R_{nep} – магнітний опір перемички;

 R_{F2} – магнітний опір потоку Φ_2 .

Через те, що середина котушек знаходиться поблизу середини стрижнів, можна вважати, що $R_{F1} = R_{F2} = R_F$. Проводимість R_F^{-1} вважаємо такою, що дорівнює половині проводимості потоку розсіювання між двома паралельними призмами, розташованими одна проти іншої [36]

$$R_F^{-1} = 0.5\mu_0(x_F h_F + y_F), \qquad (3.37)$$

$$\mu = h_F = h - c; \quad x_F = \frac{2\Delta}{L} + 0.52 + \frac{2}{\pi} \ln(1 + \frac{2c}{L});$$

$$y_F = 2\Delta[0.52, +\frac{2}{\pi}\ln(1 + \frac{2c}{L})] + c + 0.31L.$$

Падіння магнітного потенціалу у стрижні головки запису визначається згідно з виразом

$$U_{c} = 2\Phi_{\Gamma 3}R_{c} = 2B_{\Gamma 3}\frac{l_{c}}{\mu_{\Gamma 3}\mu_{0}},$$
(3.38)

де $R_c = \frac{l_c}{\mu_{\Gamma 3} \mu_0 S_{\Gamma 3}}$ – магнітний опір стрижня; $l_c = h - c$;

*µ*_{ГЗ} – відносна магнітна проникність магнітопроводу при індукції;

$$B_{\Gamma 3} = B_p \left(1 + \frac{R_p + R_\delta + R_{\Pi}}{R_F}\right).$$

Приблизно можна вважати, що $R_{nep} << R_{F2}$, тоді падіння магнітного потенціалу в перемичці

$$U_{nep} \approx \Phi_{\Gamma 3} R_{nep}, \qquad (3.39)$$

де $R_{nep} = \frac{l_{nep}}{\mu_{\Gamma 3} \mu_0}; \quad l_{nep} = L + 2c.$

На підставі (3.28), (3.31), (3.32), (3.39) визначимо падіння магнітного потенціалу у всьому ланцюгу намагнічування:

$$U_{\Sigma} = \Phi_p [(1 + \frac{R_p + R_{\delta} + R_{\Pi}}{R_F})(2R_c + R_{\Pi ep}) + R_p + R_{\delta} + R_{\Pi}].$$
(3.40)

За наведеною методикою для значення $B_{p1m} = 1,7$ *T* здійснений числовий розрахунок залежності падіння магнітної напруги у всьому ланцюгу намагнічування від величини повітряних зазорів для головки запису, магнітопровід якої виконаний з листового пермендюра товщиною 2

мм таких розмірів: c = 40 мм, h = 97 мм, $2\Delta = 85$ мм, L = 37 мм (залежності $\mu(B)$ профільного носія та пермендюра, необхідні для розрахунку, наведені на рис. 3.20).



Рис. 3.20. Залежності відносної магнітної проникності від індукції: А – сталь профільного носія; Б – пермендюр зі вмістом 1,8 % V



Рис. 3.21. Залежність сумарного падіння магнітної напруги в ланцюгу від величини повітряних зазорів

Результати розрахунку представлені на рис. 3.21, із якого можна заключити, що навіть при застосуванні пермендюра, який має індукцію насичення $B_S = 2,4$ T, у якості матеріалу магнітопроводу головки запису, що записує сумарне падіння магнітної напруги U_{Σ} дуже сильно зростає при незначному збільшенні величини повітряних зазорів δ , що підкреслює необхідність приближення до умов контактного запису мітки на масивний феромагнітний носій.

Таким чином, урахування залежності розподілення поперечної магнітної індукції в товщі профільного носія вздовж нього дозволило суттєво підвищити точність розрахунку ланцюга намагнічування та оптимізувати число ампер-витків, умови запису та габарити головки запису.

3.4. Поле мітки, нанесеної на феромагнітну конструкцію методом перпендикулярного магнітного запису

Для оптимальної побудови тракта «магнітний запис на сталеві конструкції-відтворення» вибирають один із способів нанесення магнітних міток: поздовжнє, поперечне, вертикальне, перпендикулярне намагнічування. Особливий інтерес представляє спосіб перпендикулярного намагнічування, який дозволяє здійснювати (за рівних умов) магнітний запис на феромагнітні конструкції компактними головками з достатньо високою локальністю відбитків. Але при застосуванні такого способу характер конфігурації інформаційного зовнішнього поля магнітних міток досліджено недостатньо.

Актуальним є отримання аналітичних виразів ортогональних складових напруженості просторового зовнішнього поля мітки, нанесеної на сталеву конструкцію головками для перпендикулярного запису різного типу, що дозволить раціонально проектувати пристрої безперервного діагностування сталевих конструкцій на базі пари «магнітна мітка – ферочутливий елемент».

Пласкопаралельна модель нанесення мітки на феромагнітну конструкцію двохполюсною голівкою для перпендикулярного магнітного запису [1] зображена на рис. 3.22. Вважаємо, що ширина полюсів головки запису дорівнює 2Δ , а товщина магнітоносія 2*d*. Вважаємо також, що магнітне поле запису створюється постійною за величиною по всьому тілу головки запису залишковою намагніченістю \vec{M}_0 , вектор якої направлений уздовж осі *y*; при цьому вектор намагніченості \vec{M} у тілі носія теж направлений уздовж осі *y*.

Значне зменшення протяжності магнітної мітки досягається використанням шестиполюсної головки для перпендикулярного магнітного запису [8], наведеної на рис. 3.23. Тут по обидва боки від основної двохполюсної головки з намагніченістю \vec{M}_{01} , вектор якої направлений уздовж осі *y*, розташовані додаткові полюсні наконечники з намагніченістю \vec{M}_{02} , вектор якої орієнтований уздовж осі – *y*. Тим самим створюється відповідне компенсуюче поле запису у тілі феромагнітної конструкції.



Рис. 3.22. Модель нанесення мітки методом перпендикулярного магнітного запису: 1 – двохполюсна головка запису; 2 – феромагнітна конструкція

Ідеалізована двохмірна модель носія з нанесеною міткою представлена на рис. 3.24. Вважаємо, що відносна магнітна проникність μ_r постійна за величиною у всьому об'ємі носія.

Криві пласкопаралельної залишкової намагніченості мітки \overline{M}_r при запису зазначеними магнітними головками зображені на рис. 3.25.

Для аналізу зовнішнього поля мітки використано метод, викладений у [35]. Як показали теоретичні та експериментальні дослідження залишкова намагніченість магнітної мітки описується виразом

$$\vec{M}_{r}(\vec{x}) = \vec{j}M_{rm}\frac{\beta^{2}}{\beta^{2}+\vec{x}^{2}},$$
(3.41)

де *М*_{rm} – амплітудне значення залишкової намагніченості;

β>0 – коефіцієнт, залежний від крутості та протяжності магнітної мітки.

Розкладання (3.41) в інтеграл Фур'є запишеться у вигляді

$$\vec{M}_{r}(\vec{x}) = \vec{j}M_{rm} \int_{0}^{\infty} \beta e^{-\beta\omega} \cos \bar{x} \,\omega d\omega . \qquad (3.42)$$



1 – шестиполюсна головка запису; 2 – феромагнітна конструкція



Рис. 3.24. Ідеалізована двохмірна модель носія з нанесеною міткою



Рис. 3.25. Криві розподілення залишкової намагніченості мітки в феромагнітній конструкції, нанесених:

1 – двохполюсною голівкою запису з шириною полюсів $2\Delta = 4,6d$; 2 – шестиполюсною голівкою запису

Для довільної гармонічної складової просторового спектра ω=Ω≠0

$$\vec{M}_{r\Omega} = \vec{j}M_{rm\Omega}\cos\Omega x , \qquad (3.43)$$

де $M_{rm\Omega} = M_{rm}\beta e^{-\beta\Omega}$ – амплітуда намагніченості гармоніки частоти Ω , вирішується гранична задача.

Диференціальне рівняння відносно скалярного потенціалу магнітного поля має вид

$$\Delta \varphi_{k\Omega} = \begin{cases} \frac{div \, \overrightarrow{M}_{r\Omega}}{\mu_r} = -\frac{\Omega M_{rm\Omega} \sin \Omega x}{\mu_r} & npu \ k = 2\\ 0 & npu \ k = 1, 3 \end{cases}$$
(3.44)

Рішення рівняння (3.44) запишеться у вигляді [34]

$$\begin{cases} \varphi_{1\Omega} = A_1 e^{\Omega y} \cos \Omega x \\ \varphi_{2\Omega} = (A_2 e^{\Omega y} + B_2 e^{-\Omega y}) \cos \Omega x \\ \varphi_{3\Omega} = A_3 e^{-\Omega y} \cos \Omega x \end{cases}$$
(3.45)

Воно має задовольняти граничним умовам на кожній із двох границь

$$\varphi_n = \varphi_{n+1};$$

$$\mu_n \frac{\partial \varphi_n}{\partial y} - M_{ryn} = \mu_{n+1} \frac{\partial \varphi_{n+1}}{\partial y} - M_{ry(n+1)}.$$
(3.46)

Вирази для постійних інтегрування визначаються підстановкою (3.45) у (3.46). Після підстановки A_3 в (3.45) знаходять скалярний потенціал магнітного поля в області 3, що відповідає гармоніці частоти $\omega = \Omega$, визначають потенціал, викликаний всіма складовими спектра вихідної намагніченості, згідно з виразом

$$\begin{split} \varphi_{3} &= \beta \frac{M_{rm}}{\mu_{r}+1} \left[\int_{0}^{\infty} \frac{e^{-\beta\omega}}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} e^{-(\overline{y}-1+4\alpha)\omega} \cos \overline{x} \, \omega d\omega - \right. \\ &- \frac{2\mu_{r}}{\mu_{r}+1} \int_{0}^{\infty} \frac{e^{-\beta\omega}}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} e^{-(\overline{y}+1+4\alpha)\omega} \cos \overline{x} \, \omega d\omega + \\ &+ \frac{\mu_{r}-1}{\mu_{r}+1} \int_{0}^{\infty} \frac{e^{-\beta\omega}}{\omega} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} e^{-(\overline{y}+3+4\alpha)\omega} \cos \overline{x} \, \omega d\omega \right], \end{split}$$
(3.47)

де $m = (\frac{\mu_h - 1}{\mu_h + 1})^2$.

Зводячи інтеграли до табличних та враховуючи співвідношення $\vec{H} = -grad \, \varphi$, отримуємо аналітичні вирази для горизонтальної та вертикальної складових напруженості поля в області 3

$$H_{3x} = \beta \frac{M_{\kappa m}}{\mu_{\kappa} + 1} \left[\sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \frac{\overline{x}}{(\overline{y} + \beta - 1 + 4\alpha)^{2} + \overline{x}^{2}} - \frac{2\mu_{r}}{\mu_{r} + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \frac{\overline{x}}{(\overline{y} + \beta + 1 + 4\alpha)^{2} + \overline{x}^{2}} + \frac{\mu_{r} - 1}{\mu_{r} + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \ln \frac{\overline{x}}{(\overline{y} + \beta + 3 + 4\alpha)^{2} + \overline{x}^{2}} \right];$$
(3.48)

$$H_{3y} = \beta \frac{M_{rm}}{\mu_r + 1} \left[\sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \frac{\overline{y} + \beta + 1 + 4\alpha}{(\overline{y} + \beta - 1 + 4\alpha)^2 + \overline{x}^2} - \frac{2\mu_r}{\mu_r + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \frac{\overline{y} + \beta + 1 + 4\alpha}{(\overline{y} + \beta + 1 + 4\alpha)^2 + \overline{x}^2} + \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \sum_{\alpha=0}^{\infty} m^{\alpha} \frac{\overline{y} + \beta + 3 + 4\alpha}{(\overline{y} + \beta + 3 + 4\alpha)^2 + \overline{x}^2} \right].$$
(3.49)

Для мітки, нанесеної двохполюсною головкой для перпендикулярного запису з найбільш доцільної ширини полюсів $2\Delta = 4,6d$, $\beta = 2$, а при запису шестиполюсною магнітною головкою $\beta = 1$. Розрахункові криві горизонтальної H_{3x} та вертикальної H_{3y} складових напруженості зовнішнього магнітного поля мітки в залежності від $\overline{x} = x/d$ при різних відстанях від поверхні носія $\overline{y} = \overline{y}/d$ для значень $\mu_r = 100$, $M_{rm} = 10^5 A/m$ представлені на рис. 3.26 та рис. 3.27 відповідно.



Рис. 3.26. Горизонтальні складові напруженості магнітного поля H_{3x} при різних відстанях від поверхні феромагнітної конструкції після ії намагнічування головками запису двох типів

На кривих горизонтальної складової напруженості магнітного поля мітки в діапазоні від 0 до $(\pm 0, 5\overline{x}...\overline{x})$ має місце лінійна ділянка, яка може бути використана при побудові датчиків переміщення. Максимальні значення горизонтальної складової напруженості магнітного поля мітки лежать у межах $\pm (0,9...1,3)\overline{x}$.



Рис. 3.27. Вертикальні складові напруженості магнітного поля H_{3y} при різних відстанях від поверхні феромагнітної конструкції після її намагнічування головками запису двох типів

Експерименти щодо вимірювання зовнішнього поля магнітних міток, нанесених на профільну прямокутну сталеву конструкцію, адекватно відобразили характер розподілу горизонтальних H_{3x} та вертикальних H_{3y} складових напруженості зовнішнього магнітного поля з відносною похибкою 5...8%.

Таким чином, отримані аналітичні вирази горизонтальної та вертикальної складових напруженості магнітного поля міток, нанесених на феромагнітну конструкцію головками для перпендикулярного запису, дозволяють грамотно застосовувати та розташовувати ферозондові перетворювачі в зоні дії міток при розробці пристроїв технічної діагностики.

3.5. Удосконалення конструкції ферозондів для діагностики металоконструкцій

3.5.1. Імпульсний ферозонд при вимірюванні слабких магнітних полів

В інформаційно-вимірювальних системах діагностики сталевих конструкцій часто в якості інформаційних сигналів використовуються поля намагніченого виробу або нанесених на них магнітних міток, інтенсивність яких може мати слабку інтенсивність. У таких умовах важливо оцінити якість функції перетворення ферозондів у сполученні зі схемами Брайта та обрати оптимальний режим навантаження, шунтованого ємністю конденсатора, за критерієм максимально можливої потужності вихідного сигналу.

Проаналізуємо роботу ферозонда, приймаючи наступні допущення:

1. Еквівалентна схема заміщення, зображена на рис. 3.28, відповідає роботі датчика при малих сигналах, для яких справедлива умова $H_0 << H_{3m}$, де H_{3m} – амплітуда імпульсів напруженості магнітного поля збудження.

2. Еквівалентну індуктивність обмоток, що періодично змінюється у проміжку часу 0- τ (рис. 3.29), представлено у вигляді

$$L_e(t) = \frac{L_{\mu} - L_s}{2} + \frac{L_{\mu} - L_s}{2} \cos\frac{\pi}{\tau} t.$$
 (3.47)

Ємність конденсатора *С* настільки велика, що можливо нехтувати змінною складовою напруги на опорі навантаженні *R_H*.

При розімкнутому ключі струм i_L в обмотці дорівнює струму I_0 джерела струму та потокозчеплення

$$\psi = L_e(t)I_0. \tag{3.48}$$

При замкнутому ключі постійна напруга U_C прикладена до обмотки індуктивності $L_e(t)$, тому

$$\psi = U_C t + \psi_0 \,. \tag{3.49}$$



Рис. 3.28. Еквівалентна схема заміщення ферозондового датчика



Рис. 3.29. Діаграми роботи ферозонда

Постійна інтегрування ψ_0 знаходиться із умов комутації $\psi(0_-) = \psi(0_+)$ у момент перемикання $t_k = 0$

$$\psi_0 = L_e(t)I_0 = L_H I_0.$$
(3.50)

Потокозчеплення при замкнутому ключі дорівнює

$$\psi = U_C t + L_{\mu} I_0, \qquad (3.51)$$
а струм в обмотці індуктивності

$$i_{L} = \frac{U_{C}t + L_{\mu}I_{0}}{\frac{L_{\mu} + L_{s}}{2} + \frac{L_{\mu} - L_{s}}{2}\cos\frac{\pi}{\tau}t}.$$
(3.52)

Постійна складова струму в обмотці індуктивності за період T слідування імпульсів дорівнює

$$I_{L} = \frac{1}{T} \left(\int_{0}^{\tau} i_{L} dt + \int_{\tau}^{T} I_{0} dt \right).$$
(3.53)

Після обчислення інтегралів маємо

$$I_{L} = \frac{T - \tau}{T} I_{0} + \frac{L_{\mu}}{\sqrt{L_{\mu}L_{s}}} \frac{\tau}{T} I_{0} + \frac{\tau^{2}}{T\sqrt{L_{\mu}}L_{s}} (0.5 + \frac{4}{\pi^{2}}s) U_{C}, \quad (3.54)$$

$$\text{me } s = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(a - \sqrt{a^{2} - 1})^{2k+1}}{(2k+1)^{2}}; \qquad a = \frac{L_{\mu} + L_{s}}{L_{\mu} - L_{s}}.$$

При форсованому збудженні на практиці a > 3, тому $s \approx 0$. Постійна складова струму навантаження буде дорівнювати

$$I_{\mu} = I_0 - I_L = 2\tau \frac{\sqrt{L_{\mu}L_s} - L_{\mu}}{2T\sqrt{L_{\mu}L_s} + R_{\mu}\tau^2} I_0.$$
(3.55)

Корисна потужність у навантаженні $P_{\mu} = R_{\mu}I_{\mu}^2$. Значення опору навантаження для узгодженого режиму, що визначається згідно з умовою $dP_{\mu}/dR_{\mu} = 0$, дорівнює

$$R_{H,Y32} = \frac{2T\sqrt{L_{H}L_{s}}}{\tau^{2}}.$$
 (3.56)

Приклад розрахунку. Вважаємо, що $L_{\mu} = 60 \cdot 10^{-6} \ \Gamma \mu$, $L_s = 6 \cdot 10^{-6} \ \Gamma \mu$. Для різних значень $\tau = 0,1; 1; 10$ мкс та періоду слідування імпульсів T = 100 мкс розраховано відносні значення струму I_{μ}/I_0 та

потужності сигналу $P_{_H}/I_0^2$ в опорі навантаження R_H при його зміні від 10 *Ом* до 10 *МОм*, що представлено на рис. 3.30.

Із нього видно, що максимальне значення потужності не залежить від добутку $\tau R_{H,y32}$. Це підкреслює те, що, варіюючи довжиною імпульсу збудження τ , можливо легко забезпечити постійність вихідної потужності при різних R_H , чим досягається підвищення чутливості, стабільності та економічності ферозондових датчиків при вимірюванні слабких магнітних полів.



Рис. 3.30. Залежності струму у навантаженні та потужності корисного сигналу від *R_H* при різних τ

3.5.2. Перехідні процеси в ферозондових датчиках з циліндричними магнітопроводами з урахуванням впливу вихрових струмів

При проектуванні ферозондових датчиків та приладів для магнітних вимірювань з метою мініатюризації та підвищення швидкодії первинні перетворювачі виконують на стандартних магнітних плівках на суцільних циліндричних магнітопроводах.

Експлуатація таких ферозондових перетворювачів підтвердила, що низьке енергоспоживання, високу чутливість та завадо захищеність вони мають при імпульсній формі поля збудження. Для підвищення точності розрахунку пропонується в еквівалентних схемах заміщення ферозондів, працюючих у режимі імпульсного збудження, враховувати повний електричний опір циліндричних магнітопроводів, обумовлене впливом вихрових струмів та приведене до струму джерела живлення.

Розрахунок перехідних процесів проведено при таких допущеннях: магнітопроводи представляють собою однорідне та ізотропне феромагнітне середовище з постійною еквівалентною відносною магнітною проникністю μ_e , що приблизно дорівнює центральній проникності форми *m* розімкнутого магнітопроводу; обмотки намотані без зазорів та не створюють потоків розсіювання; магнітопровід вибирається достатньо довгим (довжина *l* більше 40 радіусів r_0), що дозволяє вважати потік розсіювання поза циліндром відсутнім; всередині циліндра всі магнітні силові лінії паралельні осі.

Система рівнянь електромагнітного поля в операторній формі, що описує процеси в циліндричному магнітопроводі, має такий вигляд

$$\frac{dH(s)}{dr} = -\gamma E(s) \quad ; \quad \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r E(s) = -\mu_a s H(s) \quad , \tag{3.57}$$

де r – координата вздовж радіуса циліндра r_0 ;

H(s) та E(s) – зображення за Лапласом напруженостей магнітного та електричного полів. Число витків обмотки дорівнює $\overline{\omega}$.

Із системи (3.57) отримуємо рівняння

$$\frac{d^2 H(s)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH(s)}{dr} - \mu_a \gamma s H(s) = 0.$$
 (3.58)

Рішенням (3.58) є

$$H(s) = \frac{\varpi I(s)}{lJ_0(\sqrt{-s\mu_a\gamma}r_0)}J_0(\sqrt{-s\mu_a\gamma}r)$$

$$E(s) = \frac{\sqrt{-s\mu_a\gamma}\varpi I(s)}{\gamma lJ_0(\sqrt{-s\mu_a\gamma}r_0)}J_1(\sqrt{-s\mu_a\gamma}r)$$
(3.59)

де I(s) – зображення струму в обмотці.

Магнітний потік всередині циліндра

$$\Phi(s) = \int_{0}^{r_0} \mu_a H(s) 2\pi r dr =$$

$$= \frac{2\pi \mu_a r_0 \varpi I(s)}{l \sqrt{-s\mu_a \gamma} J_0 (\sqrt{-s\mu_a \gamma} r_0)} J_1 (\sqrt{-s\mu_a \gamma} r_0)$$
(3.60)

Складова напруги, що врівноважує е.р.с., наведену магнітним потоком, має такий вигляд

$$U(s) = \varpi s \Phi(s) =$$

$$= \frac{2\pi \mu_a r_0 \varpi^2 s I(s)}{l \sqrt{-s\mu_a \gamma} J_0(\sqrt{-s\mu_a \gamma} r_0)} J_1(\sqrt{-s\mu_a \gamma} r_0) = Z_s(s) I(s), \quad (3.61)$$

де $Z_s(s) = \frac{2\pi\mu_a r_0 \overline{\varpi}^2 s}{l\sqrt{-s\mu_a \gamma} J_0(\sqrt{-s\mu_a \gamma} r_0)} J_1(\sqrt{-s\mu_a \gamma} r_0)$ – зображення пов-

ного опору циліндра.

Після представлення функції Бесселя рядами

$$J_q(\sqrt{-s\mu_a\gamma}r_0) = (\frac{\sqrt{-s\mu_a\gamma}r_0}{2})^q \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(k+q)!} (\frac{\sqrt{-s\mu_a\gamma}r_0}{2})^{2k}$$

Маємо

$$Z_{e}(s) = \frac{\pi \mu_{a} r_{0}^{2} \sigma^{2} s}{l} \frac{\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k}}{k! k+q!} (\frac{\sqrt{-s \mu_{a} \gamma r_{0}}}{2})^{2k}}{\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k}}{(k!)^{2}} (\frac{\sqrt{-s \mu_{a} \gamma r_{0}}}{2})^{2k}}.$$
 (3.62)

Обмежуючись доданками з другим ступенем аргументу [36], запишемо зображення повного опору у вигляді

$$Z_{e}(s) = \frac{s}{ad(s+\frac{1}{a})},$$
(3.63)

де позначено $a = \frac{1}{8} \mu_a \gamma r_0^2$; $d = \frac{l}{\pi \mu_a r_0^2 \sigma^2}$.

При прийнятих обмеженням похибка не перевищує 3...5%, що є прийнятним для практичних розрахунків.

Приклад 1. Розрахувати перехідні процеси в однострижневому ферозондовому датчику з імпульсним збудженням з такими параметрами:

$$\begin{split} r_0 &= 10^{-4} \ \text{M;} \ \ l = 10^{-2} \ \text{M;} \ \ \overline{\varpi}_1 = 200, \ \ \overline{\varpi}_2 = 400, \ \ (n = 0.5); \ \ r_1 = \\ &= r_{1o\delta \text{M}} + r_{\text{GH,}\partial\text{M}} = 1 + 5 = 6 \ \ O\text{M;} \ \ r_2 = 6 \ \ O\text{M;} \ \ \gamma = 4 \cdot 10^6 \ \ (O\text{M \cdot M})^{-1}; \\ &\mu_e \approx m = \frac{l^2}{4r_0^2 \left(\lg \frac{0.6l}{r_0} - 1 \right)} = 800 \ . \end{split}$$

Еквівалентна схема заміщення навантаженого ферозондового датчика, що збуджується прямокутними імпульсами амплітудою E та тривалістю T, наведена на рис. 3.31.



Рис. 3.31. Еквівалентна схема заміщення однострижневого ферозондового датчика

Зображення напруги на навантаженні має вигляд

$$U_{H}(s) = \frac{ER_{H}}{n(b + acd)(s + \frac{cd}{b + acd})} (1 - e^{-sT}), \qquad (3.64)$$

_{де} $b = r_1 + r'_2 + R'_{H}$; $c = r_1(r'_2 + R'_{H})$.

Оригінал вихідної напруги

$$u_{H}(t) = \frac{ER'_{H}}{n(b+acd)} e^{-\frac{cd}{b+acd}t}, \text{ при, } 0 \le t \le T$$

$$u_{H}(t) = -\frac{ER'_{H}}{n(b+acd)} (1 - e^{-\frac{cd}{b+acd}T}) e^{-\frac{cd}{b+acd}(t-T)}, \text{ при } t > T.$$
(3.65)

Розрахункова та експериментальна криві $u_{H}(t)$ для E = 2B, $T = 5 \cdot 10^{-6}$ с та R = 200 Ом зображені на рис. 3.32.



Рис. 3.32. Криві вихідної напруги на навантаженні: _____ розрахунок; _ - - - - експеримент

Аналогічно розраховуються перехідні процеси у трансформаторних датчиках, а також в імпульсних трансформаторах з тороїдальними магнітопроводами, вважаючи μ_e такою, що дорівнює відносній магнітній проникливості μ речовини.

Приклад 2. Визначити форму вихідної напруги імпульсного диференційного ферозондового датчика, розімкнуті магнітопроводи яких взаємодіють з інформаційним магнітним полем. Процесі вимірювання проникність одного магнітопроводу збільшується (зменшується), а іншого – зменшується (збільшується), що викликає відповідні зміни вихрових опорів циліндрів обох на півелементів датчика.

Розрахункова схема зображена на рис. 3.33.



Рис. 3.33. Схема заміщення диференційного ферозондового датчика

Розрахунок напруги на навантаженні здійснювався для тих же параметрів схеми, що і у прикладі 1. Виняток складають величини еквівалентних магнітних проникностей μ_{e1} та μ_{e12} , які отримують прирости протилежних знаків при взаємному переміщенні диференційного ферозондового чутливого елемента та джерела магнітного поля.

Характер зміни вихідної напруги при різних переміщеннях відносно вихідного стану для випадку коли $R_H = 200$ Ом представлений на рис. 3.34.

Варто відмітити, що аналогічно розраховуються перехідні процеси в диференційних трансформаторних датчиках переміщення, розімкнуті магнітопроводи яких взаємодіють з феромагнітними тілами.





Рис. 3.34. Форма вихідної напруги диференційного ферозондового датчика:

1) $\mu_{eux,e} = 9000$; $\mu_{e1} = 800$; $\mu_{e2} = 17200$; 2) $\mu_{eux,e} = 9000$; $\mu_{e1} = 4000$; $\mu_{e2} = 14000$

Приклад 3. Розрахунок перехідного струму при розрядці конденсатора генератора через первинну обмотку ненавантаженого однострижневого ферозондового датчика. (Зазначений спосіб імпульсного збудження у низці випадків вигідно відрізняється тим, що тут внутрішній активний опір генератора практично дорівнює нулю). Параметри датчика відповідають параметрам прикладу 1. Схема приведена на рис. 3.35.



Рис. 3.35. Схема заміщення ланцюга розряду конденсатора

Зображення струму

$$I(s) = \frac{u_C(0)}{1 + adr_{10\delta M}} \cdot \frac{s + \frac{1}{a}}{s^2 + \frac{dcr_{10\delta M} + ad}{c(1 + adr_{10\delta M})}s + \frac{d}{c(1 + adr_{10\delta M})}}.$$
 (3.66)

Оригінал перехідного струму має вигляд

$$i(t) = \frac{u_C(0)ad}{1 + adr_{1o\delta\mathcal{M}}} \left[\frac{-\alpha + \beta + \frac{1}{a}}{2\beta} e^{(-\alpha + \beta)t} - \frac{-\alpha - \beta + \frac{1}{a}}{2\beta} e^{(-\alpha - \beta)t} \right] =$$

$$= \frac{u_C(0)ad}{1 + adr_{1o\delta\mathcal{M}}} e^{-\alpha t} \left[ch\beta t + \frac{-\alpha + \frac{1}{a}}{\beta} sh\beta t \right],$$
(3.67)

де $-\alpha \pm \beta$ – корні рівняння $s^2 + \frac{dcr_{1o\delta M} + ad}{c(1 + adr_{1o\delta M})}s + \frac{d}{c(1 + adr_{1o\delta M})} = 0$.

На рис 3.36 зображено криві струму прирізних ємностях конденсатора.



Рис. 3.36. Перехідні струми при різних ємностях конденсатора:

1) $C = 0.01 \text{ MK}\Phi$; 2) $C = 0.1 \text{ MK}\Phi$

3.5.3 Метод розрахунку вихідної напруги ферозондового датчика з циліндричним магнітопроводом в усталеному режимі

До сучасних первинних перетворювачів інформаційних систем діагностики технічного стану виробів пред'являються все більш жорсткі вимоги щодо точності, стабільності, швидкодії, діапазону вимірювальних величин, вартості, технологічності виготовлення, мініатюризації. Як уже відзначалося, достатньо високі метрологічні характеристики мають магнітометричні перетворювачі, виконані на базі суцільних циліндричних магнітопроводах.

Для практичних розрахунків корисною вважається розробка інженерної методики визначення основних параметрів, насамперед вихідної напруги, навантажених ферозондів з циліндричними магнітопроводами з урахуванням впливу вихрових струмів при полі збудження синусоїдної форми.

Система рівнянь, що описує електромагнітний процес у циліндричному магнітопроводі при напруженості магнітного поля, що змінюється синусоїдально, має вид

$$\frac{dH}{dr} = -\gamma \dot{E} \quad ; \qquad \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r E = -j \omega \mu_0 \mu_e \gamma \dot{H} \,. \tag{3.68}$$

Із цієї системи отримується рівняння

$$\frac{d^{2}\dot{H}}{dr^{2}} + \frac{1}{r}\frac{d\dot{H}}{dr} - j\omega\mu_{0}\mu_{e}\gamma\dot{H} = 0.$$
(3.69)

Рішенням цього рівняння є вирази

$$\dot{H} = \frac{\varpi \dot{I}}{lJ_0(pr_0)} J(pr) ;$$

$$\dot{E} = \frac{p \, \varpi \dot{I}}{\gamma lJ_0(pr_0)} J_1(pr) , \qquad (3.70)$$

де

$$p = \sqrt{-j\omega\mu_0\mu_e\gamma} = \sqrt{-j}\frac{q}{r_0}$$
; ϖ – число витків первинної

обмотки.

Обчислимо повний опір суцільного циліндра, приведений до струму *İ* джерела, на основі виразу

$$\dot{U} = \dot{E}(r_0) 2\pi r_0 = Z_{e}\dot{I} = (r_e + jx_e)\dot{I}.$$
(3.71)

Звідси

$$Z_{s} = \frac{2\pi \varpi^{2} r_{0} p}{\gamma J_{0}(pr_{0})} J_{1}(pr_{0}) = \frac{\pi \varpi^{2}}{\gamma l} (M + jK), \qquad (3.72)$$

де

$$M = 2 \frac{berq \ ber \ q + bei \ q}{ber^{2} q + bei^{2} q}, \qquad (3.73)$$

$$K = 2 \frac{berq \ bei \ q - bei q \ ber \ q}{ber \ ^2 q + bei \ ^2 q}.$$
(3.74)

У табл. 3.2 та на рис. 3.37 наведено значення *M* та *K* у залежності від *q*.

При розрахунку усталених режимів магнітометричних та електромагнітних первинних перетворювачів, у яких магнітопроводи розімкнуті (одноелементні та диференційні ферозонди, ферозондові градієнтометри, індуктивні датчики, одноелементні та диференційні трансформаторні датчики), слід вважати еквівалентну відносну магнітну проникність такою, що приблизно дорівнює центральній проникності форми *m*.

Таблиця 3.2

q	М	K
0,0	0	0
0,5	0,00775	0,2475
1,0	0,12	0,98
1,5	0,5625	2,0475
2,0	1,36	3,08
2,5	2,375	3,875
3,0	3,24	4,5
3,5	4,042	5,02
4,0	4,64	5,76
5,0	6,0	7,0

Значення М та К у залежності від q

Для вибраного значення q_3 із рис. 3.37 знаходять коефіцієнти M та K, по яким r_6 та x_6 . Ці величини вводять до відповідних розрахункових еквівалентних електричних схем заміщення ланцюгів.



Рис. 3.37. Залежності М та К від q

Аналогічно здійснюють розрахунок електромагнітних пристроїв з котушками, обмотки яких намотані на тороїдальні магнітопроводи (магнітні підсилювачі, високочастотні трансформатори). Запропонована методика може використовуватися для створення датчиків різних приладів для контролю працездатності металоконструкцій.

3.6 Розроблені технічні рішення для побудови пристроїв для діагностування технічного стану конструкцій

Розглянемо декілька підходів до побудови пристроїв для діагностування технічного стану конструкцій.

Пристрій безперервного діагностування технічного стану тягового елемента рухомої кліті [33]. Схема пристрою наведена на рис. 3.38.



Рис. 3.38. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану тягового елемента рухомої кліті

Пристрій містить кліть 1, тяговий елемент 2, П-подібний постійний магніт 3, магнітну мітку 4, нанесену на тяговий елемент 2 на відстані l від верхньої поверхні кліті 1, перший 5 та другий 6 магніточутливі елементи, закріплені за допомогою кронштейна 7 до кліті 1 та розташовані у вихідному положенні симетрично по обидва боки відносно центру магнітної мітки 4 на відстані a/2, а також розміщено генератор 8 тактових імпульсів, підсилювачі 9, 10, перший 11 та другий 12 аналогово-цифрові перетворювачі, перший 13 та другий 14 двійкові віднімачі, перший 15 та другий 16 двійкові поділювачі, помножувач 17, двійковий перетворювач 18 відстані a між першим 5 та другим 6 магніточутливими елементами, блок порівняння 19, двійковий перетворювач 20 аварійного зміщення центра магнітної мітки та блок 21 управління та контролю.

Пристрій працює таким чином. Перед діагностуванням за допомогою П-подібного постійного магніту 1 на тяговому елементі 2 (наприклад, сталевому канаті) наносять магнітну мітку на відстані l від верхньої поверхні кліті 1. Радіальна складова напруженості зовнішнього поля магнітної мітки 4 у вихідному положенні має вигляд H_{r0} , причому в процесі експлуатації через вплив механічних навантажень на тяговий елемент 2 вона зміщується на певну відстань Δl та зменшується по амплітуді (H_r).

При шиклічному русі тягового елемента 2 імпульсами генератора тактових імпульсів, які подаються на управляючі входи першого 11 та другого 12 аналогово-цифрових перетворювачів, дозволяється подача на їхні інформаційні входи через підсилювачі 9. 10 сигналів протилежної полярності з першого 5 H_{r+} та другого 6 H_{r-} магніточутливих елементів. Далі ці сигнали у двійковому коді віднімаються у першому 13 двійковому віднімачі, у першому двійковому поділювачі 15 здійснюється поділення сигналу H_{r+} , який поступає з виходу першого 11 аналогово-цифрового перетворювача, на сигнал $H_{r+} - H_{r-}$, потім цей результат помножується помножувачем 17 на відстань а, яка поступає з двійкового перетворювача 18 відстані між першим 5 та другим 6 магніточутливими елементами, у подальшому від цього результату у другому 14 двійковому віднімачу віднімається сигнал a/2, який поступає з виходу другого 16 двійкового поділювана, потім з виходу другого 14 двійкового віднімача сигнал, еквівалентний зміщенню Δl центра магнітної мітки, подається на вхід блока 19 порівняння, на другий вхід якого поступає сигнал двійкового перетворювача 20 аварійного зміщення Δl_{δ} центра магнітної мітки 4.

З виходу блока 20 порівняння сигнали поточного зміщення Δl центра магнітної мітки 4 у залежності від кількості циклів *n* підйому кліті 1 та аварійного (порогового) зміщення Δl_{δ} центра магнітної мітки 4 при критичній кількості циклів n_{δ} (рис. 3.39) подаються на вхід блока 21 управління та контролю, де прогнозується ресурс безаварійної роботи тягового елемента 2, аналізується його передаварійний стан та виробляється команда на зупинку при аварійному значенні зміщення Δl_{δ}



Рис. 3.39. Зміна зміщення центра магнітної мітки 4

Пристрій для безперервного діагностування технічного стану тягового елемента канатної дороги [2]. Схема пристрою наведена на рис. 3.40.



Рис. 3.40. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану тягового елемента рухомої кліті

Пристрій містить П-подібний постійний магніт 1, тяговий елемент 2, першу 3 та другу 4 магнітні мітки, розташовані одна від одної на відс-

тані *l*, перший-четвертий 5-8 магніточутливі елементи, причому перший 5 та другий 6 магніточутливі елементи розташовані у взаємно перпендикулярних площинах у центрі першої 3 магнітної мітки, третій 7 та четвертий 8 магніточутливі елементи розміщені у вихідному положенні симетрично по обидва боки відносно центру другої 4 магнітної мітки на відстані a/2, а також застосовано блок 9 формування нуль-перетинання, підсилювачі 10, 11, перший 12 та другий 13 аналогово-цифрові перетворювачі, перший 14 та другий 15 двійкові віднімачі, перший 16 та другий 17 двійкові поділювачі, помножувач 18, двійковий перетворювач 19 відстані *a* між третім 7 та четвертим 8 магніточутливими елементами, блок порівняння 20, двійковий перетворювач 21 аварійного зміщення Δl_{δ} центра магнітної мітки та блок 22 управління та контролю.

Пристрій працює наступним чином. Перед діагностуванням за допомогою П-подібного постійного магніту 1 на тяговому елементі 2 (наприклад, сталевому канаті) наносять першу 3 та другу 4 магнітні мітки, розташовані одна від одної на відстані *l*. Зовнішнє поле першої 3 магнітної мітки у робочому стані канатної дороги характеризується ортогональними складовими напруженостей H_{r1} та H_{r1} , а складова напруженості поля другої 4 магнітної мітки у вихідному положенні має вигляд H_{r20} , причому в процесі експлуатації через вплив механічних навантажень на тяговий елемент 2 вона зміщується на певну відстань Δl та зменшується по амплітуді (*H*_{r2}). При циклічному русі тягового елемента 2 при знаходженні першого 5 та другого 6 магніточутливих елементів проти центру першої 3 магнітної головки блок 9 формування нуль-перетинання формує відповідний імпульс, який по управляючим входам першого 12 та другого 13 аналогово-цифрових перетворювачів дозволяє подачу на їхні інформаційні входи через підсилювачі 10, 11 сигнали протилежної полярності з третього 7 *H*_{r2+} та четвертого 8 *H*_{r2-} магніточутливих елементів. Далі ці сигнали у двійковому коді віднімаються у першому 14 двійковому віднімачі, у двійковому поділювачі 16 здійснюється поділення сигналу $H_{r^{2+}}$, який поступає з виходу першого 12 аналогово-цифрового перетворювача, на сигнал $H_{r^{2+}} - H_{r^{2-}}$, потім цей результат помножується помножувачем 18 на відстань а, яка поступає з двійкового перетворювача 19 відстані між третім 7 та четвертим 8 магніточутливими елементами, у подальшому від цього результату у другому 15 двійковому віднімачу віднімається сигнал а/2, який поступає з виходу другого 17 двійкового поділювана, потім з виходу другого 15 двійкового віднімача сигнал, еквівалентний зміщенню Δl центра другої 4 магнітної мітки, подається на вхід блока 20 порівняння, на другий вхід якого поступає сигнал двійкового перетворювача 21 аварійного зміщення Δ*l*_δ центра другої 4 магнітної мітки.

З виходу блока 20 порівняння сигнали поточного зміщення Δl центра другої 4 магнітної мітки у залежності від кількості циклів *n* проходження тягового елемента повз магнітних міток 5-8 та аварійного (порогового) зміщення Δl_{δ} центра другої 4 магнітної мітки при критичній кількості циклів n_{δ} (рис. 3.57) подаються на вхід блока 22 управління та контролю, де прогнозується ресурс безаварійної роботи тягового елемента 2, аналізується його передаварійний стан та виробляється команда на зупинку при аварійному значенні зміщення Δl_{δ} .

Пристрій для безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу [32]. Схема пристрою наведена на рис. 3.41.



Рис. 3.41. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу

Пристрій містить блок 1 управління та контролю, магнітні мітки 2, 3, нанесені одна проти іншої відповідно на колісний центр та бандаж, ферозонди 4, 5, розташовані на кузовній частині на відстані *l* один від іншого на відстані, що дорівнює відстані *l* між центрами магнітних міток 2, 3, причому виходи ферозондів 4, 5 приєднані через диференціальний підсилювач 6 до блока 1 управління та контролю.

Пристрій працює наступним чином. При котінні колісної пари по рейці за відсутності взаємних переміщень колісного центру та бандажу зовнішнє поле магнітних міток 2, 3 не змінюється, вихідні сигнали ферозондів 4, 5 ідентичні, тому на виході диференціального підсилювача 6 сигнал відсутній. За наявності взаємних переміщень колісного центру та бандажу магнітні мітки 2, 3 змінюють своє взаємне розташування, при цьому на виході ферозондів 4, 5 сигнали відрізняються, на виході диференціального підсилювача 6 з'являється сигнал, амплітуда якого пропорційна взаємному переміщенню, а фаза сигналу визначає напрямок обертання колісної пари. Цей сигнал про переддефектний стан колісної пари та/або порушення її роботи подається у блок 1 управління та контролю, в якому виробляється відповідна команда на попередження або команда на термінове гальмування поїзда.

Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання. Схема пристрою наведена на рис. 3.42.

Пристрій містить блок 1 управління та контролю, постійний магніт 2, прикріплений до одного з елементів з'єднання 3, що діагностується, другий постійний магніт 4, прикріплений до другого елемента з'єднання 5, що діагностується, два ферозонди 6, 7, розташовані на нерухомій конструкції (на кресленні не показана) на відстані l один від іншого на відстані, що дорівнює відстані l між центрами постійних магнітів 2, 4, блок 8 визначення центру постійного магніту та електронний ключ 9.

Пристрій працює наступним чином. При обертанні тіл у момент знаходження ферозонда 6 проти центру постійного магніту 2 на його виході сигнал дорівнює нулю, а на виході блока 8 визначення центру постійного магніту формується імпульс, який дозволяє передачу сигналу з виходу ферозонда 7 на інформаційний вхід електронного ключа 9. За відсутності взаємних переміщень елементів з'єднання 3, 5 зовнішнє поле постійних магнітів 2, 4 не змінюється, при цьому у момент знаходження ферозонда 6 проти центру постійного магніту 2 на виході ферозонда 7 сигнал відсутній, тому сигнал також відсутній і на вході блоку 1 управління та контролю. За наявності взаємних переміщень елементів з'єднання 3, 5 постійні магніти 2, 4 змінюють своє взаємне розташування, зміщуючись на відстань x один відносно іншого, при цьому у момент знаходження ферозонда 6 проти центру постійного магніту 2 на виході ферозонда 7 з'являється сигнал, амплітуда якого пропорційна взаємному переміщенню елементів з'єднання 3, 5, а його фаза визначає напрямок їхнього обертання. Цей сигнал через електронний ключ 9 подається у блок 1 управління та контролю, в якому аналізується як рівень переддефектного стану, так і факт порушення роботи з'єднань елементів тіл обертання. Відповідно з цим у блоці 1 управління та контролю виробляються команди на попередження або на термінове гальмування.



Рис. 3.42. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання

Пристрій для діагностування технічного стану сталевого виробу на базі цифрового автоматичного коерцитиметра. Його схема зображена на рис. 3.42. Пристрій містить соленоїд 1, генератор 2 лінійного струму, блок 3 керування, пороговий блок 4, елемент I 5, лічильник 6 імпульсів, цифровий індикатор 7, тригер 8, ферозонди 9-12, виходи яких між собою з'єднані послідовно, піковий детектор 13, диференцюючий ланцюг 14, генератор 15 тактових імпульсів, дільник 16 імпульсів, сталевий виріб 17, а також містить блок 18 пам'яті початкової величини коерцитивної сили, блок 19 віднімання, блок 20 визначення поточного та аварійного стану сталевого виробу, таймер 21. Ферозонди 9, 10 та 11, 12 розташовані попарно по обидва боки вздовж сталевого виробу 17 від площини симетрії соленоїда 1 на відстані, що дорівнює чверті *l*/4 його довжини *l*.

На рис. 3.43 наведено схему розташування соленоїда 1, протяжного за довжиною сталевого виробу 17 та ферозондів 9-12.



Рис. 3.42. Пристрій для діагностування технічного стану сталевого виробу на базі цифрового автоматичного коерцитиметра

На рис. 3.44 наведено часові діаграми роботи пристрою для діагностування технічного стану сталевого виробу на базі цифрового автоматичного коерцитиметра.

На рис. 3.45 наведено діаграму зміни у часі коерцитивної сили *H*_C навантаженого сталевого виробу 17.



Рис. 3.43. Схема розташування соленоїда 1 та ферозондів 9-12



Рис. 3.44. Часові діаграми роботи пристрою



Рис. 3.45. Діаграма зміни у часі коерцитивної сили

Пристрій працює наступним чином. Після установки соленоїда 1 та ферозондів 9-12 на навантажений (р) сталевий виріб 17 і при подачі напруги живлення блок 3 керування вмикає генератор 2 лінійного струму і в соленоїд 1 подається струм, який лінійно зростає (проміжок 0-а діаграми *I*, рис. 3.44), в результаті чого намагнічується сталевий виріб 17 і водночас збільшуються сигнали на виході ферозондів 9-12. При досягненні насичення сталевого виробу 17, що відповідає струму I_{S1} (точка *a*, рис. 3.44), сигнал з виходів ферозондів 9-12 сягає максимального значення та через піковий детектор 13 та диференцюючий ланцюг 14 поступає у блок 3 керування, який дає команду генератору 2 лінійного струму. По цій команді струм зменшується до нуля (точка б, рис. 3.44) та в момент переходу струму через нуль змінюється його полярність. У соленоїд 1 подається струм зворотної полярності, який розмагнічує сталевий виріб 17. У момент, коли струм дорівнює нулю, пороговим блоком 4 вмикається тригер 8, який підключає по першому входу елемент І 5, при цьому імпульси, які виробляються генератором 12 тактових імпульсів, через дільник 13 імпульсів та другий вхід елемента І 5 поступають на лічильник 6 імпульсів. Зі зростанням струму відбувається розмагнічування сталевого виробу 17 і в момент рівності магнітного поля, наведеного в соленоїді 1, коерцитивній силі H_{C1} сталевого виробу 17, що відповідає значенню струму I_{H_{C1}} (точка в, рис. 3.44), сумарний сигнал з виходів ферозондів 9-12 зменшується до нуля та відбувається перекидання тригера 8. Закривається елемент І 5 та припиняється надходження імпульсів з генератора 15 тактових імпульсів через дільник 16 імпульсів, який зменшує кількість імпульсів, вироблених, удвічі, на лічильник 6 імпульсів, при цьому встановлюється кількість імпульсів N₁/2, пропорційна половині величини коерцитивної сили $H_{C1}/2$. Струм в соленоїді 1 продовжує змінюватися за лінійним законом до I_{S2} (точка г, рис. 3.44), при цьому відбувається перемагнічування сталевого виробу 17 і в точці г (рис. 3.44) він намагнічується до насичення, що відповідає збільшенню вихідного сигналу з виходів ферозондів 9-12 до максимуму. Під дією цього сигналу через піковий детектор 13 та диференцюючий ланцюг 14 блок 3 керування впливає на генератор 2 лінійного струму. По цій команді струм знову зменшується до нуля (точка д, рис. 3.44) та в момент переходу струму через нуль блок 3 керування міняє напрям струму генератора 2 лінійного струму на зворотний. У момент, коли струм дорівнює нулю, пороговим блоком 4 вмикається тригер 8, який підключає по першому входу елемент I 5, при цьому імпульси, які виробляються генератором 12 тактових імпульсів, через дільник 13 імпульсів та другий вхід елемента І 5 поступають на лічильник 6 імпульсів. Зі зростанням струму знову відбувається розмагнічування сталевого виробу 17 і в момент рівності магнітного поля соленоїда 1 коерцитивній силі *H*_{C2} сталевого виробу 17, що відповідає значенню струму $I_{H_{C2}}$ (точка *e*, рис. 3.44), на виході ферозондів 9-12

з'являється нуль, що спричиняє перекидання тригера 8. Закривається елемент І 5 та припиняється надходження імпульсів з генератор 15 тактових імпульсів через дільник 16 імпульсів на лічильник 6 імпульсів, при цьому до кількості імпульсів $N_1/2$, зареєстрованої ним при першому ліченні, пропорційній значенню $H_{C1}/2$, додається кількість імпульсів $N_2/2$, пропорційна значенню $H_{C2}/2$, і на цифровий індикатор 7 подається $N_1/2 + N_2/2 = N$ імпульсів, що відповідає коерцитивній силі $H_{C1}/2 + H_{C2}/2 = H_C$ сталевого виробу 17.

При першій подачі напруги живлення вимірюється початкова коерцитивна сила H_{C0} , величина якої з додаткового виходу лічильника 6 імпульсів подається в блок 18 пам'яті початкової величини коерцитивної сили. Поточні величини коерцитивної сили H_C вимірюються через інтервал часу τ (рис. 3.45), який задається таймером 21. У подальшому сигнали H_C та H_{C0} поступають на входи блока 19 віднімання, на виході якого формується сигнал їхньої різниці $H_C - H_{C0}$, що подається у блок 20 визначення поточного та аварійного стану сталевого виробу 17. На підставі аналізу динаміки зміни різниці $H_C - H_{C0}$ у ньому визначається поточний технічний стан сталевого виробу 17, прогнозується ресурс його безаварійної роботи та фіксується аварійний стан при досягненні коерцитивної сили величини $H_{C\delta}$ в момент часу t_{δ} (рис. 3.45).

Пристрій безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу. Схема пристрою представлена на рис. 3.46. Пристрій містить колісний центр 1, бандаж 2, формувачі імпульсів 3, 4, виконані у вигляді сталевих пластин, прикріплених на колісному центрі 1 та бандажі 2, перетворювачі 5, 6 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу, встановлених на одній радіальній прямій з однаковим дотичним зазором до формувачів імпульсів 3, 4, блок 7 визначення напрямку обертання колісної пари, перший-третій *RS*-тригери 8-10, перший, другий елементи I 11, 12 та блок 13 управління та контролю.



Рис. 3.46. Пристрій безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу

На рис. 3.47 наведено діаграми, які пояснюють принцип дії пристрою.



Рис. 3.47. Часові діаграми, які пояснюють принцип дії пристрою

Пристрій працює наступним чином. При котінні колісної пари по рейці у будь якому напрямку імпульси з перетворювача 5 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу (рис. 3.47, епюра 5) подаються на вхід блока 7 визначення напрямку обертання колісної пари, на виході якого формуються імпульси 7-1 та 7-2 (рис. 3.66, епюри 7-1, 7-2), а на

виходах першого *RS*-тригера 8 – сигнали *УПЕРЕД*, *НАЗАД* (рис. 3.65; рис. 3.66, епюри *УПЕРЕД*, *НАЗАД*).

При обертанні колісної пари проти годинної стрілки за наявності взаємних переміщень колісного центру 1 та бандажу 2 формувачі імпульсів 3, 4 змінюють своє взаємне розташування, при цьому імпульс від перетворювача 6 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу відстає у часі від імпульсу від перетворювача 5 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу (рис. 3.66, епюри *УПЕРЕД*, 5, 6), на виході першого елемента I 11 з'являється пропорційний зміщенню сигнал φ , у той час як на виході другого елемента I 12 сигнал – φ відсутній.

При обертанні колісної пари за годинною стрілкою за наявності взаємних переміщень колісного центру 1 та бандажу 2 формувачі імпульсів 3, 4 змінюють своє взаємне розташування, при цьому імпульс від перетворювача 5 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу відстає у часі від імпульсу від перетворювача 6 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу (рис. 3.66, епюри *НАЗАД*, 6, 5), на виході другого елемента I 12 з'являється пропорційний крутному моменту сигнал $-\varphi$, у той час як на виході першого елемента I 18 сигнал φ відсутній.

Ці сигнали про переддефектний стан колісної пари та/або порушення її роботи подається у блок 13 управління та контролю, в якому виробляється відповідна команда на попередження або команда на термінове гальмування поїзда.

Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання. Схема пристрою представлена на рис. 3.48.

Пристрій містить елементи тіл обертання 1, 2, формувач 3 інформаційного сигналу, виконаний у вигляді сталевої пластини, безконтактний двохелементний перетворювач 4 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу, диференційний підсилювач 5, передавач сигналів 6, передавальну антена 7, приймальну антену 8, приймач сигналів 9 та блок 10 управління та контролю.

Пристрій працює таким чином. При обертанні тіл за відсутності взаємних переміщень елементів з'єднання 1, 2 безконтактний двохелементний перетворювач 4 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу знаходиться проти центру формувача 3 інформаційного сигналу (при цьому кут зміщення елементів з'єднання 1, 2 $\varphi = 0$), тому на виході диференційного підсилювача 5 сигнал дорівнює нулю (рис. 3.49, епюра U_5), а також сигнал відсутній і на вході блоку 10 управління та контролю.



Рис. 3.48. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання



Рис. 3.49. Вихідний сигнал диференційного підсилювача 5



Рис. 3.50. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання

За наявності взаємних переміщень елементів з'єднання 1, 2 формувач 3 інформаційного сигналу у залежності від напрямку обертання тіл зміщується відносно безконтактного двохелементного перетворювача 4 індуктивного, ємнісного або струмовихрового типу на кут φ або – φ , при цьому на виході диференційного підсилювача 5 з'являється відповідний сигнал $U_{5\varphi}$ або $U_{5-\varphi}$ (рис. 3.68, епюра U_5). Цей сигнал поступає на передавач сигналів 6 та через передавальну антену 7 безконтактно передається на приймальну антену 8 і далі через приймач сигналів 9 подається у блок 10 управління та контролю, який виробляє сигнал про порушення технічного стану з'єднання.

Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання. Його схема дана на рис. 3.50. Пристрій містить елементи тіл обертання 1, 2, до елемента з'єднання 2 закріплений постійний магніт 3, на елементі з'єднання 1 розташовано ферозонд 4, що знаходиться в магнітному полі постійного магніту 3, а також містить передавач сигналів 5, передавальну антена 6, приймальну антену 7, приймач сигналів 8 та блок 9 управління та контролю.

Пристрій працює таким чином. При обертанні тіл за відсутності взаємних переміщень елементів з'єднання 1, 2 ферозонд 4 знаходиться на лінії магнітної нейтралі постійного магніту 3 (при цьому кут зміщення елементів з'єднання 1, 2 $\varphi = 0$), тому на виході ферозонда 4 сигнал дорівнює нулю (рис. 3.51, епюра H_{sepm}), а також сигнал відсутній і на вході блоку 9 управління та контролю.

За наявності взаємних переміщень елементів з'єднання 1, 2 постійний магніт 3 зміщується відносно ферозонду 4 на кут φ або $-\varphi$, при цьому на виході ферозонда 4 з'являється відповідний сигнал $H_{sepm \ \varphi}$ або $H_{sepm-\varphi}$ (рис. 3.70, епюра H_{sepm}). Цей сигнал поступає на передавач сигналів 5 та через передавальну антену 6 безконтактно передається на приймальну антену 7 і далі через приймач сигналів 8 подається у блок 9 управління та контролю, який виробляє сигнал про порушення технічного стану з'єднання.



Рис. 3.51. Вихідний сигнал ферозонда

В якості ферозонда 4 доцільно застосовувати, наприклад, диференційний ферозонд [31], схема якого зображена на рис. 3.52. Диференційний ферозонд містить сердечник у вигляді двох однакових стрижнів 1, розташованих паралельно один одному, обмотку збудження 2, виконану у вигляді чотирьох секцій, встановлених попарно на кінцях стрижнів 1 сердечника, додаткові секції 3, розміщені по всій довжині стрижнів 1 сердечника, вимірювальну обмотку 4, виконану з двох секцій, розташованих в центрі кожного стрижня зверху додаткових секцій 3 обмотки збудження, та обмотку управління 5 у вигляді чотирьох секцій, встановлених попарно на кінцях стрижнів 1 сердечника, причому кожна пара секцій, розташованих з одного кінця стрижнів 1 сердечника, з'єднана між собою послідовно зустрічно.

Диференційний ферозонд працює наступним чином. Обмотки збудження 2 та додаткові секції 3 живляться струмом змінної форми, який створює о об'ємі стрижнів 1 сердечника рівні за величиною магнітні поля. Під їхньою дією та дією зовнішнього поля у вимірювальній обмотці 4 наводиться відповідна Е.Р.С. *е*. Подачею струму управління ± в обмотки управління 5 забезпечується електричне управління положенням діаграмами направленості диференційного ферозонда.



Рис. 3.52. Диференційний ферозонд

Узагальнюючи огляд можливих рішень для магнітометричного контролю переддефектного стану ОМПН необхідно зазначити, що застосування індуктивних датчиків при всіх їхніх перевагах більш доцільно для магнітних полів, що швидко змінюються у часі, або для швидкісного обстеження рухомих об'єктів з постійним магнітним полем. Для вивчення статичного магнітного поля, яке має неоднорідності, більш доцільним є використання магніторезистивних датчиків.

Висновки до розділу 3

1. Зміни напружено-деформованого стану металоконструкції призводить для зміни магнітного поля в цих ділянках. Переддефектний стан, характеризується значними пластичними деформаціями ділянок, де формуються мікропошкодження, що є причиною руйнування. Це все призводить до значної зміни магнітних властивостей таких ділянок і магнітного поля в них.

2. Магнітне поле в ділянках з дефектами, або у різних стадіях проходження пластичної деформації може бути визначено різними магнітометричними методами. Всі магнітометричні методи мають певні обмеження і сферу застосування.

3. Дефекти структури і пластично здеформовані ділянки мають яскраво виражений просторовий розподіл мгнітних властивостей, геометрічні характеристики яких корелюють з геометричними характеристиками цих ділянок і дефектів. Тому для визначення переддефектного стану доцільним є вимірювання магнітного поля у декількох напрямках.

4. Індуктивних датчикі більш доцільно для магнітних полів, що швидко змінюються у часі, або для швидкісного обстеження рухомих об'єктів з постійним магнітним полем. Для вивчення статичного магнітного поля, яке має неоднорідності, більш доцільним є використання магніторезистивних датчиків.

5. Обробка отриманого сигналу з датчику має вирішальне значення для отримання інформації про властивості матеріалу досліджуваної ділянки ОМПН і визначення її переддефектного стану.

Перелік посилань до розділу 3

- 1. А.с. СССР. №513379. Бюл. изобр. №17. 1976. Магнитная головка / Евтухов Ю.Г., Яковенко В.В., Смирный М.Ф. и др.
- А.с. СССР. №618785. Бюл. изобр. №29. 1978. Магнитная головка для поперечной записи сигналов на железнодорожный рельс / Смирный М.Ф. и др.
- Власов В.Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В.Т. Власов, А.А. Дубов. – Издательство: ЗАО «Тиссо», 2004. – 424 с.

- Габльовська Н.Я. Система контролю розвитку мікротріщин у напруженодеформованих металічних конструкціях // Автореферат канд. дисс. – Івано-Франківськ, 2008. – 20 с.
- Дубов, А.А. Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров магнитной памяти метала / А.А. Дубов // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 1 – С. 8-16.
- Ковшова Ю.С. Остаточный ресурс оболочковых конструкций, работающих в условиях квазистатического нагружения // Канд. дисс. – Уфа, 2014. – 127 с.
- Контроль напряженного состояния сталей по коэрцитивной силе / Губский С. А., Сухомлин В. И., Волох В. И. – Машинобудування, 2014. – №13. – С. 6-10.
- 8. Лауфер М.П., Чацкис Л.Г. Анализ полей магнитных головок // Электромеханика. – 1973. – №10. – С. 1059-1062.
- Метод аналізу вимірювань коерцитивної сили під час технічної діагностики металоконструкцій кранів з різними товщинами елементів / О. В. Григоров, С. О. Губський, В. А. Попов, М. Ф. Хорло // Метрологія та прилади. – Харків, 2009. – № 5. – С. 51-55.
- Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напруженодеформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу: МВ 0.00-7.01-05. – Х., 2005. – 77 с.
- Михалев А.Ю. Разработка метода оценки остаточного ресурса основного металла труб нефтегазопроводов на основе измерения твердости с малой нагрузкой // Автореферат канд. дисс. – Ухта, 2012. – 24 с.
- 12. Михеев М. Н. Магнитные методы стуктурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. М. : Наука, 1993. 252 с.
- Некоторые закономерности изменения коэрцитивной силы пластичных (незакаленных) сталей при активном растяжении / В. М. Мацевитый, Г. Я. Безлюдько, К. В. Вакуленко и др. // Вестник НТУ "ХПИ" : сб. науч. тр. – Х., 2010. – С. 19–24.
- Патент України № 83545, G06K 7/08, опубл. 10.09.2013, бюл. № 17. Пристрій для зчитування інформації з профільного металевого носія // Смирний М.Ф.
- Патент України № 103985 G01N 27/72, опубл. 10.12.2013, бюл. № 23. Пристрій для діагностики зношеності труб / Пеленський Р.А., Пеленська І.Р., Гамола О.Є., Маланчак О.Р.
- Патент України № 34523 G01M 7/00, опубл. 10.05.2011, бюл. № 9. Спосіб та пристрій для вібраційної діагностики машин циклічної дії / Артемов В.І., Бакай І.М., Бугай Ю.М. та ін.
- Патент України № 34828 G08B 23/00, опубл. 15.03.2001, бюл. № 2. Пристрій безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу / Осенін Ю.І., Богданов О.В.
- Патент України № 37164 G08B 23/00, опубл. 16.04.2001, бюл. № 3. Пристрій безперервного діагностування технічного стану колісних пар / Голубенко О.Л., Осенін Ю.І., Смирний М.Ф., Богданов О.В.

- Патент України № 40200 G01N 3/40, опубл. 25.03.2009, бюл. № 6. Спосіб контролю технічного стану конструкції в процесі експлуатації методом твердості / Лебедєв А. О., Музика М.Р., Швець В.П.
- Патент України № 43945 G01M 15/00, опубл. 15.01.2002, бюл. № 1. Спосіб діагностування технічного стану гумотросових стрічок в експлуатаційних умовах / Капуста Л.В., Смирний М.Ф., Львов С.О. та ін.
- Патент України № 53020 G01В 7/00, опубл. 15.01.2003, бюл. № 1. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання / Марченко Д.М., Голубенко О.Л., Богданов О.В., Осенін Ю.І.
- Патент України № 53033 G08B 23/00, опубл. 15.01.2003, бюл. № 1. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану нерознімних і рознімних з'єднань елементів тіл обертання / Марченко Д.М., Голубенко О.Л., Богданов О.В., Осенін Ю.І.
- Патент України № 59259 G01N 27/90, опубл. 15.03.2001, бюл. № 2. Прохідний електромагнітний перетворювач для контролю сталевих канатів / Бережинський В.І., Брюханов О.М., Софієв В.М. та ін.
- Патент України № 63480 G01N 27/00, опубл. 10.10.2011, бюл. № 19. Система моніторингу стану трубопроводів по вимірюваннях коерцитивної сили / Анисимов В.П., Безлюдко Г.Я.
- Патент України № 68109 G01L 1/00, опубл. 12.031.2012, бюл. № 5. Пристрій для визначення механічних напружень у феромагнітних конструкціях / Смирний М.Ф.
- Патент України № 69847 G05В 23/02, опубл. 10.05.2012, бюл. № 9. Спосіб безперервного діагностування стану технічного об'єкта / Марченко Д.М., Горбунов М.І., Ковтанець М.В.
- 27. Патент України № 74376 G01N 22/00, опубл. 25.10.2012, бюл. № 20. Спосіб діагностування виробничих об'єктів / Марченко Д.М.
- 28. Патент України № 77463 G01M 7/00, опубл. 15.12.2006, бюл. № 12. Пристрій для діагностики технічного стану технологічних агрегатів / Сокуренко А.В., Шеремет В.О., Козенко Г.В. та ін.
- Патент України № 85649 G01R 33/12, опубл. 25.11.2013, бюл. № 22. Цифровий автоматичний коерцитиметр / Смирний М.Ф.
- Патент України № 89415 G01N 27/80, опубл. 25.04.2014, бюл. № 8. Пристрій для електромагнітного контролю стану каналів ливарної МГД установки / Моісеєв .Ю.В., Дубодєлов В.І., Слажнєв М.А., Богдан К.С.
- Патент України №103155, G01R 33/02, опубл. 10.12.2015, бюл. №23. Диференційний ферозонд / Смирний М.Ф., Марченко Д.М., Шапран Є.М., Бойко Г.О. та ін.
- Патент України №103160, В61F 5/00, опубл. 10.12.2015, бюл. №23. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану колісних пар залізничного екіпажу / Смирний М.Ф., Марченко Д.М., Шапран Є.М., Бойко Г.О. та ін.
- Патент України №105478, G01В 7/24, опубл. 25.03.2016, бюл. №6. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану тягового елемента ка-

натної дороги / Смирний М.Ф., Марченко Д.М., Шапран Є.М., Бойко Г.О. та ін.

- 34. Патент України №105479, G01B 7/24, опубл. 25.03.2016, бюл. №6. Пристрій для безперервного діагностування технічного стану тягового елемента рухомої кліті / Смирний М.Ф., Марченко Д.М., Шапран Є.М., Бойко Г.О. та ін.
- 35. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. Ч. III. М. 1975.
- Ротерс Г.К. Электромагнитные механизмы / Г.К. Ротерс. М. Л.: Госэнергоиздат, 1949.
- Швець С.М. Поєднання електромагнітного і магнітного методів при ферозондовій дефектоскопії великогабаритних деталей // Автореферат канд. дисс. – Івано-Франківськ, 2008. – 20 с.
- Шубочкин А.Е. Развитие методов и средств вихретокового и магнитного контроля металлопроката для оценки его остаточного ресурса // Докт. дисс. – М., 2014. – 237 с.

Розділ 4

ПРИЛАД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДДЕФЕКТНОЖИВЛГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

4.1. Опис апаратної частини приладу

Управляюча плата приладу побудована на базі мікроконтролеру Atmel ATmega328 I має наступні характеристики:

- мікроконтролер Atmel ATmega 328;
- робоча напруга (логічний рівень) 5 V;
- вхідна напруга (рекомендується) 7-12 V;
- вхідна напруга (межі) 6-20 V;
- цифрові / О Pins I 14 (6 з яких забезпечують вихід ШІМ);
- Pins аналогових входів 8;
- DC Струм на I / О Ріп 40 мА;
- флеш-пам'ять 32 Кб, з яких 2 КБ використовується завантажувачем;
- SRAM 2 КБ;
- EEPROM 1 Кб;
- тактова частота 16 МГц;
- розміри 0,73 "x 1,70";
- довжина 45 мм;
- ширина 18 мм;
- вага 5 г.

Було використано готовий модуль, що має комерційну назву Arduino Nano V 3.0 [1 - 3].

Принципова електрична схема та схемі підключення зовнішніх пристроїв показано на рис. 4.1, 4.2.






Рис. 4.2. Схема підключення зовнішніх пристроїв [5]

Призначення виводів мікросхеми atmega328p-au наведено на рис. 4.3

В якості сенсора для вимірювання магнітного поля було використано модуль на основі чутливого елемента HMC5883L.

Honeywell HMC5883L є модулем для поверхневого монтажу для здійснення низькопольового (невисокої інтенсивності поля) магнітного зондування за допомогою цифрового інтерфейсу для додатків, таких як LowCost.

НМС5883L використовує анізотропні магніторезистивні сенсори (AMR), з високою роздільною власністю щодо напрямку осі та високу чутливість Ці магнітні датчики фірми є одними з найбільш чутливих датчиків низького магнітного поля в промисловості.

Характеристики HMC5883L:

- діапазон вимірювання: ± 1,3 8 гаус (задається програмно);
- точність: 5 мілігаус;

- живлення: 3,3 3,6 В (можливо живлення від стабілізатора плати);
- розміри плати: 14x13x3(13) мм;
- вага (з контактною площадкою): 1,1 г;
- кількість задіяних входів: 2.



Рис. 4.3. Призначення виводів мікросхеми atmega328p-au

Блок-схему HMC5883L наведено на рис. 4.4

Для оперативного виведення інформації використовується модуль Nokia 5110 LCD.

Модуль Nokia 5110 LCD являє собою з плату, на якій розміщується рідкокристалічний індикатор Nokia 5110, якій містить контролер PCD8544 фірми Philips.



Рис. 4.4. Блок-схема HMC5883L [4]

Для з'єднання модуля з іншими пристроями плата містить роз'єми з'єднувача і отвори для припаювання проводів. Також є 4 настановних отвори, які розташовані по кутах плати.

Монохроматичний дисплей Nokia 5110 LCD має підсвічування світлодіодами. За роки виробництва Nokia 5110 застосовувався і застосовується в широкому спектрі додатків.

Характеристики модуля Nokia 5110 LCD:

- живлення: напруга 2,7 ... 3,3 B, струм;
- підсвічування відключено 5 мА;
- підсвічування включено 20 мА.

Температура повітря під час роботи 0 ... 50

Температура зберігання -10 ... 70

Головний компонент модуля Nokia 5110 LCD - РКІ індикатор. Має вбудовані генератори напруги живлення і зміщення ЖК-елементів. Інтерфейс SPI введення інформації.

Nokia 5110 може працювати в чотирьох режимах:

- Нормальний;
- Інверсія зображення;
- Порожній екран;
- "Всі крапки включені".

Так само користувачеві доступно управління температурним режимом, напругою живлення і зсуву.

- Напруга живлення 2,7 ... 3,3 В, струм до 320 мкА;
- Частота тактування до 4 МГц;
- Час скидання не менше 100 нс.

Дисплей є матрицею ЖК-елементів та мікросхему PCD8544 для їх управління, розміщені в корпусі встановленому на платі. На ній так само розміщені чотири світлодіода підсвічування екрану. Інформація про стан точок дисплея зберігається в оперативній пам'яті контролера PCD8544, кожній точці відповідає один біт пам'яті. Так само вбудований лічильник адрес, який автоматично збільшується при запису чергового байта інформації в пам'ять.

Управління дисплеєм здійснюється по інтерфейсу SPI, дисплей є веденим пристроєм. Однак, замість звичайних чотирьох ліній управління присутні лише три. Це лінії тактування CLK, вибору кристала SCE і вхідних даних MOSI. Лінія виходу MISO відсутня. Це призводить до необхідності застосовувати спеціальні методи управління. Працює інтерфейс в режимах SPI-0 або SPI-3. В Nokia 5110 присутня також додаткова лінія управління Інформація/Команда - D/C. Кожен байт, який передається в дисплей, може бути інтерпретований як команда або інформаційний байт, в залежності від рівня на лінії D/C.

Передача інформації однонаправлена.

Управління дисплеєм здійснюється відправкою командного слова через інтерфейс SPI. Розмір слова 1 байт. Команди управління розділені на 3 категорії.

Функції управління

Встановити тип функцій - вказує, з яким типом функцій буде працювати модуль основними або розширеними.

Встановити режим живлення - включає або відключає живлення.

Встановити режим адресації - визначає тип адресації пам'яті: вертикальний або горизонтальний. У першому випадку після запису байта даних буде збільшений лічильник Y-адреси, тобто, запис буде йти по стовпчиках. У другому - лічильник X-адреси, запис буде йти по рядках.

Функції передаються Nokia 5110 LCD, коли на лінії D/\overline{C} низький рівень. Вони визначаються одним командним словом. Це слово необхідно відправити в дисплей на початку роботи. формат:

-00100PD VH

Біт PD визначає режим живлення, встановлений PD означає режим відключення (power-down).

Біт V режим адресації: 1 - вертикальна, 0 - горизонтальна.

Біт Н тип функцій, з якими буде йти подальша робота: 0 - звичайний, 1 - розширений.

Як видно, необхідно запам'ятовувати поточний стан дисплея, щоб при установці нового значення параметра не втратити інформацію про значеннях інших. Команда 00100PDVH присутня в обох наборах команд.

Основні функції

Встановити режим відображення 00001D0E. Визначає режим відображення: порожній екран, всі крапки включені, нормальне відображення, інверсне відображення. Е - ознака інверсії зображення, D - виведення зображення. Якщо D = 0, то екран або повністю очищений E = 0, або повністю чорний E = 1.

Встановити X-адресу - команда 1xxxxxx, або 0x80 + x вибір горизонтальної позиції в поточному рядку, куди буде виводитися зображення. Де x = 0 найлівіша позиції, 83 - найправіша.

Встановити Y-адресу - команда 01000ууу встановлює Y-адреса комірки, куди буде записаний наступний байт.

Команда 0х40 + у вибір номера рядка (сторінки) на яку виводиться зображення. Y = 0 самий верхній рядок, 5 - найнижча. Рядок має висоту 8 точок.

Розширені функції

Розширений набір команд вибирається після передачі команди 00100PDV1.

Встановити температурний режим. Команда 000001tt, або 0x04 + t вибір одного з чотирьох режимів температурної корекції. Залежно від режиму буде по-різному змінюватися напруга дисплея при зміні температури [5].

Встановити напругу зсуву ЖК-елементів дисплея. Команда 00010bbb, або 0x10 + b вибір одного з восьми режимів розрахунку зсуву рівнів для управління LCD. Для звичайних дисплеїв від Nokia рекомендується режим 0001011, або 0x13.

Встановити напруги живлення ЖК-елементів дисплея. Команда 1vvvvvv, або 0x80 + v вибір напруги на генераторі підвищеної напруги для LCD. При v = 0 генератор відключений.

Ініціалізація дисплея повинна бути виконана протягом 30 мс після появи живлення в наступній послідовності:

- скинути, встановивши на відповідному вході низький рівень на 100 нс або більше;

- включити дисплей і вибрати розширений набір команд, пославши 0x21;

- направити команду зміщення напруги 0х13;
- встановити температурну корекцію командою 0x04;

- включити генератор підвищеної напруги на рівень 6,42 В командою 0хВ8;

- повернутися в стандартний набір команд, пославши 0x20;
- включити графічний режим командою 0x0C.

Після цих дій Nokia 5110 LCD готовий до роботи.

Підключення модуля Nokia 5110 LCD Схему підключення сигналів на контакти модуля показаний на рис. 4.5 (на окремих моделях розташування контактів може відрізнятися).

Сигнали і лінії модуля VCC Живлення 3,3 В GND Загальний провід SCE Включення, активний низький рівень Reset Скидання, активний низький рівень D/C Дані/команда: 0 - дані, 1 – команда



Рис. 4.5. Розташування контактів [3]

SDIN Вхід інтерфейсу SCLC Тактовий сигнал LED підсвічування.

Якщо до інтерфейсу SPI мікроконтролера не підключені інші пристрої, то для економії контактів основного керуючого модуля приладу і скорочення кількості ліній зв'язку контакт вибору активного пристрою SCE слід з'єднати на платі модуля з контактом GND. Але є недолік. Якщо контролер Nokia втратив синхронізацію з MK, то це неможливо виявити.

Більш надійне підключення слід робити «притягнувши лінію SCE до високого рівня резистором 100-500 кОм, щоб виключити вплив перешкод на контролер, поки МК знаходиться в стані скидання.

При роботі з мікроконтролерами AVR, зручно використовувати інтерфейс USART в режимі SPI ведучий [5, 6].

Режим має SPI наступні переваги та недоліки:

Переваги:

- повнодуплексна передача даних за замовчуванням;

- більш висока пропускна здатність в порівнянні з І²С або SMBus;

- можливість довільного вибору довжини пакету, довжина пакету не обмежена вісьмома бітами;

- простота апаратної реалізації:

- нижчі вимоги до енергоспоживання в порівнянні з І²С і SMBus;

 можливе використання в системах з нізкостабільной тактовою частотою;

- веденим пристроям не потрібна унікальна адреса, на відміну від таких інтерфейсів, як І²С, GPIB або SCSI;

- використовується тільки чотири виводи, що набагато менше, ніж для паралельних інтерфейсів;

 односпрямований характер сигналів дозволяє при необхідності легко організувати гальванічну розв'язку між ведучим і веденими пристроями;

- максимальна тактова частота обмежена тільки швидкодією пристроїв, що беруть участь в обміні даними.

Недоліки:

- необхідно більше виводів, ніж для інтерфейсу І²С;

- ведений пристрій не може управляти потоком даних;

- немає підтвердження прийому даних з боку відомого пристрою (ведучий пристрій може передавати дані «в нікуди»); - немає певного стандартного протоколу виявлення помилок;

- за дальності передачі даних інтерфейс SPI поступається таким стандартам, як UART і CAN;

- наявність безлічі варіантів реалізації інтерфейсу;
- відсутність підтримки «гарячого підключення» пристроїв.

Режим SPI-3 (СРНА = 1, СРОL = 1). Це означає, що поки обмін відсутній, на лінії SCLK високий рівень, а дані з лінії SDIN контролер читає по наростаючому фронті на лінії SCLK протягом 100 нс. При цьому вони повинні бути виставлені мінімум за 100 нс до наростання фронту. Передача здійснюється по 8 біт, спочатку старший. Рівень на лінії D / \overline{C} визначає, як трактувати отримані дані. Високий рівень означає, що передані дані повинні бути виведені на дисплей, низький рівень - передана команда. Контролер читає значення на цій лінії разом з останнім (молодшим) бітом кожного переданого байту даних. При використанні асинхронної апаратної передачі з цим можуть виникнути труднощі. Перед установкою рівня необхідно дочекатися завершення передачі попереднього байту.

Для зберігання інформації використовуються модуль Micro-SD CARD з роз'ємом для установки Micro-SD карти флеш-пам'яті. Електрична схема модулю містить необхідний мінімум елементів, які забезпечують роботу інтерфейсу карти. Модуль містить світлодіод, світіння якого говорить про працюючому живленні модуля.

Обмін інформацією з картою пам'яті відбувається по інтерфейсу SPI, який використовується і для дисплея.

Схема модулю наведена на рис. 4.6.

Контакти інтерфейсу модуля підписані на нижньому боці плати, фото на початку сторінки. Про всяк випадок наводимо найменування контактів, розташованих починаючи від світлодіода [2].

Було обрано модуль micro-SD-карт, бо його габарити та вага приблизно у півтори рази менші, ніж модуля для SD-карт пам'яті.

Основні характеристики модуль micro-SD-карт:

- живлення: 3-5 В (можливо живлення від стабілізатора плати);
- підтримка карт: micro-SD/TF;
- розміри: 24x41(45)x3(6) мм;
- вага: 5,75 г (без картки).

Призначення контактів micro-SD картки у SPI режимі наведено на рис. 4.7 та у табл. 1.



Рис. 4.6. Схема модулю Micro-SD CARD



Рис. 4.7. Контакти micro-SD картки

Таблиця 4.1

№ контакту	Ім'я	Тип лінії	Опис
1	-		Не використовується
2	CS	Ι	Вібір чипу
3	DI	Ι	Вхід даних
4	VCC	S	Плюс живлення
5	SCLK	Ι	Тактовий сигнал
6	GND	S	Земля живлення
7	DO	O/PP	Вихід даних
8	-		Не використовується

Призначення контактів micro-SD картки

Примітка: І – вхід; О – вихід; Ѕ – живлення; РР – двотактний вихід

Блок-схему приладу та загальна електрична схема наведені на рис.4.8, 4.9.



Рис. 4.8. Блок-схема приладу

Особливістю Arduino Nano є відсутність напруги 3,3 В при живленні від зовнішнього джерела (не через USB роз'єм). Оскільки нам потрібна ця напруга для живлення дисплея, то остаточно було використано в якості джерела живлення акумулятор 3,6 В та DC-DC підвищувач для формування напруги 5 В і подачі її на USB-роз'єм плати. Для цього використовувався проміжний кабель. Це рішення на наш погляд не є оптимальним і пов'язано виключно з наявністю дисплея з живленням 3,3 В. Існують інші версії дисплея, з вбудованим стабілізатором напруги, який дозволяє живити його від 5 В. В цьому випадку живлення приладу буде організовано значно простіше. На наш погляд перспективним є використання DC-DC – перетворювача, з широким спектром вхідної напруги та вихідною напругою 5 В. Це дозволить використовувати в якості джерел живлення будь-який акумулятор, або батарею напругою від 0,9 до 5 В.

Загальний вигляд одного з попередніх варіантів приладу на макетній платі показано на рис. 4.10.

Оскільки для обстеження металоконструкцій у незручних місцях габарити та вага приладу мають вирішальне значення було прийнято рішення створити зразок приладу у вигляді моноблоку, якомога менших розмірів та ваги. При необхідності збільшити ці параметри, або зробити виносний датчик нескладно.

В перспективі бажано створити спеціальний корпус для приладу, що забезпечував би клас захисту на рівні ір-64, або вище. Ця задача цілком може бути вирішена, але наявне обладнання не дозволяє цього зробити в межах нашого дослідження. Було використано готовий корпус із зовнішніми розмірами 55х105х40 мм. Вага приладу із акумулятором і встановленою карткою склала 135 г.







Рис. 4.10. Прилад на макетній платі

Готовий варіант приладу у корпусі наведено на рис. 4.11.

Для захисту від зовнішнього впливу датчик було додатково залито шаром епоксидної смоли.

Для включення приладу натиснути треба перемикач включення живлення «I/0». Перемикач виконано у вигляди кнопки з фіксацією.

Потенційно можливо переведення приладу на живлення від стандартного акумулятора для мобільних телефонів 3,7 В, різної ємності, але не менщ 0,8 Агод. В якості експериментів прилад живився від акумулятора Nokia BL-5C і пропрацював на одній зарядці більше 5 годин. Вибір схеми живлення може диктуватися доступом до стаціонарної мережі для перезарядки акумуляторів.

Впродовж 2 - 3 секунд відбувається ініціалізація всіх складових приладу, перевірка їх працездатності, наявності та справності карти для зберігання інформації. Після цього на дисплей виводиться сповіщення про готовність до вимірювання, або інформація про помилку (список сповіщень наведено далі).

При необхідності вмикають кнопку підсвічування дисплею «Lt», яку також виконано у вигляді кнопки з фіксацією. Треба пам'ятати, що при ввімкненій підсвітці розрядка джерела живлення пришвидшуються.



Рис. 4.11. Зібраний прилад у корпусі: а – розкритий корпус, б – закритий

Для початку вимірювання натискають кнопку «Меt». На дисплеї висвічується попередження, що вимірювання почнеться через 3 секунди и цифрова комбінація, яка позначає ім'я файлу, до якого буде занесено інформацію. Це ім'я необхідно записати, або запам'ятати для подальшої ідентифікації результатів вимірювань. За 3 секунди необхідно встановити прилад вимірювальною головкою до поверхні і почати повільно рухати вздовж обраної траєкторії. На дисплеї будуть змінюватися значення вимірювального магнітного поля по 3 координатам. Припинення вимірювання здійснюється повторним натисканням кнопки «Меt». При цьому відбувається запис останніх значень та закриття файлу.

При подальшому вимірювання процес повторюється до повного заповнення картки пам'яті. Рекомендується після закінчення вимірів на конструкції переносити дані з картки на комп'ютер для унеможливлення випадкової їх втрати.

4.2. Опис програми управління приладом

Управляюча програма для контролеру та компонентів приладу наведено нижче.

```
// Підключення необхідних бібліотек
#include <Wire.h>
#include <HMC5883L.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_PCD8544.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
```

// визначення входів/виходів мікроконтролеру для зв'язку з периферійними блоками

const int CS_PIN = 4; HMC5883L compass; int thermoDO = 8; // SO int thermoCLK = 10; //SCK Adafruit_PCD8544 display = Adafruit_PCD8544(5, 6, 7, 8, 9); int error = 0; int inPin = 3; // кнопка на вході d3 int button = 0; // Налаштування void setup() ł

// Встановлюємо швидкість роботи порту

Serial.begin(9600);

// Старт протоколу І2С

Wire.begin(): // Start the I2C interface.

// Ініціація датчика НМС5883L

compass = HMC5883L(); // Construct a new HMC5883 compass.

// Перевірка працездатності датчику

error = compass.SetScale(0.88); // Set the scale of the compass.

if (error != 0) // If there is an error, print it out.

// Повідомлення про помилку при отладиі (йде на підключений комп'ютер)

Serial.println(compass.GetErrorText(error));

error = compass.SetMeasurementMode(Measurement Continuous); // Set the measurement mode to Continuous

if (error != 0) // If there is an error, print it out.

// Повідомлення про помилку при отладці (йде на підключений

комп'ютер)

```
Serial.println(compass.GetErrorText(error));
// Ініціалізація дисплею
display.begin();
// Встановлюємо контраст
display.setContrast(40);
// Встановлюємо колір тексту
display.setTextColor(BLACK);
// Встановлюємо розмір тексту
display.setTextSize(1);
// Очишуємо дисплей
display.clearDisplay();
// Команда виконання
display.display();
// Пауза 100 мс
delay(100);
// Інформація на ПК для отладки «Ініціалізуемо SD-карту»
Serial.print("Initializing SD card...");
// Встановлюємо пін CS на адаптері в якості вихіду
pinMode (CS PIN, OUTPUT);
pinMode(inPin, INPUT);
if (!SD.begin(CS PIN))
```

// Інформація на ПК для отладки «Помилка ініціалізації SD-

карти»

```
Serial.print("Card Failrue"):
        // Інформація на дисплей «Помилка SD-карти»
        display.setCursor(20, 1):
        display.println("Card Failrue");
        display.display();
        // Повторна спроба ініціації
        return:
        }
        // Інформація на ПК для отладки «Карта готова»
        Serial.print("Card Ready");
        }
        // Повторюючийся (робочий) цикл
        void loop()
        MagnetometerRaw raw = compass.ReadRawAxis();
        Output(raw);
        // Output the data down the serial port.
        void Output(MagnetometerRaw raw)
        // Зчитування значення з кнопки «Met»
        button = digitalRead(inPin);
        Serial.println (button);
        // Якщо кнопка натиснута
        if (button = 1) {
        // Генеруємо ім'я файлу, як кількість мілісекунд, що пройшла
з початку включення приладу
        filename = millis():
        // Виводимо на дисплей сповішення про початок вимірювання
та ім'я файлу
        display.setCursor(20, 1);
        display.println("Metering will start in 3s");
        display.setCursor(10, 20);
        display.println("Filename:");
        display.setCursor(30, 20);
        display.println(filename);
        display.display();
        delay(3000);
        // Відкриваємо файл з ім'ям filename та записуємо в нього
```

```
File dataFile = SD.open(filename, FILE WRITE);
        if (dataFile)
        // Запис поточних значень у файл
        dataFile.print(raw.XAxis):
        dataFile.print(",");
        dataFile.print(raw.YAxis);
        dataFile.print(",");
        dataFile.println(raw.YAxis);
        // Увага! Дані не записано у файл, доки з'єднання не закрито!
Закриваємо файл.
        dataFile.close():
        // Вивід поточних значень на дисплей
        // Очищення дисплею
        display.clearDisplay();
        // Встановлення курсору у потрібну позицію
        display.setCursor(20, 1):
        // Виведення інформації (далі команди повторюються)
        display.println("Metering:");
        display.setCursor(10, 20);
        display.println("X=");
        display.setCursor(30, 20);
        display.println(raw.XAxis):
        display.setCursor(10, 30);
        display.println("Y=");
        display.setCursor(30, 30);
        display.println(raw.YAxis);
        display.setCursor(10, 40);
        display.println("Z=");
        display.setCursor(30, 40);
        display.println(raw.ZAxis);
        display.setCursor(60, 40);
        display.println(digitalRead(14));
        display.display();
        }
        else
          ş
        // Виведення на дисплей сигналу про помилку. Далі перевірка з
```

підключенням ПК

display.clearDisplay(); display.setCursor(20, 1);

```
display.println("Error");
display.display();
}
else
{
display.clearDisplay();
display.setCursor(20, 1);
// Виведення на дисплей сигналу готовності
display.println("Ready");
display.display();
}
}
```

4.3. Тестування приладу на зразках

4.3.1. Визначення впливу стану поверхні на чутливість приладу

Зразки для дослідження були виготовлено з сортового прокату із сталі ВСт3Сп, як типового представника матеріалів з яких виготовляють металоконструкції для ОМПН.

На першому етапі будо поставлено завдання виявити вплив стану поверхні зразку на визначення дефектів, або переддефектного стану, тобто наявності ділянки з наклепом.

Для цього було обрано зразки з полоси 4х40 мм довжиною 200 мм і відтворено наступні стани поверхні:

1. Стан поставки – поверхню покрито тонким шаром окисних плівок з невеликими слідами іржі.

2. Значний шар окисної плівки – поверхню покрито шаром іржі завтовшки кілька десятих мм.

3. Зачищена поверхня – поверхню зразка зачистили шліфувальним папером до «металевого блиску.

4. Окрашена поверхня – поверхня в стані поставки було окрашено спочатку шаром грунтівки ГФ-021, а потім покрито двома шарами фарби.

5. Імітація багатошарового лакофарбового покриття, яке місцями відшаровується – шар акрилової шпаклівки 1 мм, яку швидко висушили для штучного відшаровування з подальшим фарбуванням в один шар. Во всіх випадках на зворотньому боці відносно вимірювання магнітного поля на середині зразку створювалася зона наклепу за допомогою керну.

Зовнішній вид зразків показано на рис. 4.12.



Рис. 4.12. Зразки для визначення впливу стану поверхні а – бік де нанесено покриття, б – бік з «дефектом»

Результати вимірювання магнітного поля на наведених зразках представлено на рис. 4.13 – 4.17.

Необхідно зазначити, що виявлявся «дефект», який знаходиться під поверхнею і має розмір кілька мм в перетині.



Рис. 4.13. Магнітне поле поблизу імітації дефекту для зразка у стані поставки



Рис. 4.14. Магнітне поле поблизу імітації дефекту для зразка з розвиненою окисною плівкою



Рис. 4.15. Магнітне поле поблизу імітації дефекту для зразка з зачищеною поверхнею



Рис. 4.16. Магнітне поле поблизу імітації дефекту для зразка з тонким лакофарбовим покриттям

Тестування приладу на обраних зразках виявило наступну закономірність. Природні окисні плівки невеликої товщини та лакофарбові покриття суттєво не впливають на чутливість приладу. Товсті покриття, особливо, ті, що місцями відшаровуються погіршують чутливість приладу. Граничною межею можна вважати 1 мм, при якому чутливість зменшується вдвічі.

Тому, для надійної діагностики ОМПН необхідно зняти на ділянках, яки обстежуються старі багатошарові лакофарбові покриття. Тонкий шар іржі, окісні плівки, та «свіжі» лакофарбові покриття на чутливість приладу практично не впливають.

Тому для подальших досліджень використовувалися зразки в стані поставки.



Рис. 4.17. Магнітне поле поблизу імітації дефекту для зразка з багатошаровим покриттям, яке частково відшаровується

4.3.2. Визначення впливу позиціонування датчику та швидкості його переміщення на чутливість приладу

Оскільки датчик магнітометру вимірює магнітне поле поблизу поверхні деталі відразу у трьох напрямках, потрібно витримувати єдине положення датчику під час всього вимірювання. Використання приладу на реальних конструкціях передбачає переміщення датчику вздовж вимірюванної ділянки вручну. Тому необхідно було дослідити, як незначне відхилення (приймалося максимальне відхилення у 10 градусів відносно кожної осі) впливає на чутливість приладу до дефектів.

В якості зразка використовували зразок, з «дефектом» в вигляді накернених точок (рис. 4.12, б)

Датчик закріпляли на направляючих принтеру замість головки, зразок встановлювали на опору і проводили заміри магнітного поля вздовж зразка для різних положень датчику (рис. 4.18):

- нормальне положення з зазором біля 0,5 мм;
- повернуто відносно вертикальної осі Z на 10 градусів;
- повернуто відносно горизонтальної осі Х на 10 градусів;
- повернуто відносно горизонтальної осі У на 10 градусів.



Рис. 4.18. Пристосування для автоматичного переміщення датчика

При вимірювання спеціальний пристрій керував двигуном принтера таким чином, що він переміщав датчик вздовж осі зразка на 2 мм, потім виконувався замір магнітного поля, потім датчик переміщався в наступну точку. Таким чином заміри відбувалися у статичному положенні.

Порівняння отриманих результатів показало, що відхилення при зміні позиціонування датчика в невеликих межах практично не впливають на його чутливість. Положення дефектної зони визначалося впевнено (рис. 4.19)

Можна стверджувати, що незначні відхилення датчика при ручному переміщенні не впливають суттєво на чутливість приладу.

Після цього, за допомогою того ж пристрою проводили вимірювання при безперервному русі датчика без зупинок. В даному випадку вимірювання відбувалося 10 разів за секунду.



Рис. 4.19. Результати вимірів для різних позиціонувань датчика

Оскільки пристосування автоматично повертало датчик на початковий стан, вимірювання отримали абсолютно тотожні для швидкостей до 20 мм/с. З прагматичних міркувань уявити, що дефектоскопист буде рухати датчик швидше складно, тому зроблено висновок, що швидкість руху у межах 0 – 20 мм/с не впливає на чутливість приладу.

4.3.3. Визначення впливу типу та розташування дефектів на чутливість приладу

Чутливість приладу до низки типів дефектів було перевірено на зразках, які виготовлено з полоси 40х4 мм в стані поставки.

На них було створено імітації різних дефектів, що мають місце в реальних металоконструкціях.

Було досліджень наступні дефекти:

- локальне та розподілене корозійне пошкодження;
- імітація пори (свердлення);
- імітація поверхневої тріщини у стадії зароджування (надріз);
- імітація макротріщини (розрив);
- зварні шви з повним проваром;
- зварні шви з великим непроваром;

- зварні шви з закритим маленьким непроваром (розмір на поперечном переріза 0,1x0,5 мм); зварні шви з поодинокою порою (свердлення);

- локальна місцева пластична деформація різного ступеня, що спричинена ударною та статичною дією.

Виконувалися шляхом надрізу глибиною 0,5 мм абразивним кругом завтовшки 1 мм.

Надрізи орієнтувалися на зразках наступним чином:

- поперек повздовжньої осі;
- під кутом 45 градусів до повздовжньої осі;
- вздовж осі.

Оскількі раніш будо встановлено, що зміни магнітного поля в зоні дефекту має обмежене розповсюдження (не більш 1-2 мм за умовні межі дефекту), на одному зразку виконували всі три «дефекти». Схема розташування та розміри надрізів показано на рис. 4.20.



Рис. 4.20. Схема розташування надрізів

Отримані результати (ділянка поблизу «дефекта») наведено на рис. 4.21 – 4.23.



Рис. 4.21. Результати вимірів для поперечного надрізу

Таким чином було точно встановлено чутливість приладу до відносного розташування «дефекту». Для надійного його знаходження необхідно вести сканування поперек розташування дефекту. Найбільш невдалий напрямок – під кутом 45 градусів відносно повздовжньої осі дефекту.



Рис. 4.22. Результати вимірів для надрізу під кутом 45 градусів



Рис. 4.23. Результати вимірів для повздовжнього надрізу

Фото деяких з інших дефектів наведено на рис. 4.24-4.27.



Рис. 4.24. Зразки з розподіленою та місцевою корозією



Рис. 4.25. Зразок із «розривом»



Рис. 4.26. Зразок із зварним швом



Рис. 4.27 Зразок із швом та імітацією пори

Корозійне пошкодження було виконано шляхом електролітичної корозії в 3 % розчині повареної солі.

Результати вимірювання магнітних полів ділянок поблизу дефектів показано на рис. 4.28 – 4.35.



Рис. 4.28 Магнітне поле плаского зразка із свердленням діаметром 4 мм і глибиною 2 мм виконаного з зворотного боку



Рис. 4.29. Магнітне поле плаского зразка з локальним корозійним ураженням глибиною 0,25 мм



Рис. 4.30. Магнітне поле плаского зразка з розподіленим корозійним ураженням глибиною 0,15 мм



Рис. 4.31. Магнітне поле плаского зразка з «розривом» завширшки 0,5 мм



Рис. 4.32. Магнітне поле плаского зразка зі зварним швом та непроваром



Рис. 4.33. Магнітне поле плаского зразка із зварним швом та повним проваром



Рис. 4.34. Магнітне поле плаского зразка із зварним швом та внутрішнім невеликим непроваром



Рис. 4.35 Магнітне поле плаского зразка із зварним швом та імітацією пори

Можна зазначити наступне. Прилад чутливо реагує на локальне значне зменшення перетину зразку. Тобто чутливість до дефектів типу тріщина, пора, непровар, тощо дуже висока. Як було показано раніше має значення розташування дефекту відносно напрямку сканування. Бажано сканувати в напрямку, поперек тріщини чи непровару. Якщо вірогідний напрямок дефекту визначити складно, необхідно проводити сканування у щонайменше у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Прилад слабо реагує на наявність зварного шва. Це можна пояснити тим, що на невеликих зразках зона пластичної деформації шву слабко виражена, тим паче на пластичних сталях. Цю особливість приладу можна віднести до позитивних рис, бо поле від зварного шва не заважає знаходити реальні дефекти типу непровару, тріщини, або пори.

Прилад суттєво по-різному реагує на ділянки металу, який було деформовано із різною швидкістю. Місця, де метал був деформований швидко – мають набагато більш виражені зміни у магнітному полі, ніж місця, де метал був деформований статичним повільно навантаженням. Ця особливість потребує подальшого вивчення. Результати буде наведено у наступному підрозділі.

4.3.4. Вплив попереднього намагнічування на чутливість приладу

Деякі зразки мали попереднє намагнічування з невідомих причин. Оскільки реальні металоконструкції також можуть мати високий рівень намагнічування внаслідок впливу зовнішніх факторів (електромагнітних полів, магнітного поля землі для довгих трубопроводів, тощо) було досліджено такі випадки.

При перевищенні значення магнітной індукції 8 Гс, прилад показує максимальне можливе значення магнітного поля (переповнення). Наприклад, на рис. 4.36 по осі z величина магнітної індукції становить 4096 – тобто переповнення.

Встановити наявність дефекту, або переддефектного чи переддефектного стану на цій ділянці неможливо. Тому для цих зразків проводилося розмагнічування звичайною котушкою змінного магнітного поля (рис. 4.37) по відомій схемі, із збільшенням дистанції від котушки до зразка і перемагнічуванням його змінним полем із затухаючою амплітудою

В результаті розмагнічування прилад зафіксував поблизу дефекту поле, яке показано на рис. 4.38.



Рис. 4.36. Магнітне поле зразка з пластично деформованою статичним зусиллям ділянкою діаметром 6 мм



Рис. 4.37. Котушка для розмагнічування зразків

Як видно з рис. 4.38 картина виявилося доволі розмитою. Тому було прийнято рішення залишити зразок на місяць поклавши його на довгий трубопровід, що розташований у напрямку із півночі на південь з мето пришвидшення намагнічування. Після витримки магнітне поле зразку стало більш виразним в районі дефекту (рис. 4.39).



Рис. 4.38. Магнітне поле зразка з пластично деформованою статичним зусиллям ділянкою діаметром 6 мм після розмагнічування



Рис. 4.39. Магнітне поле зразка з пластично деформованою статичним зусиллям ділянкою діаметром 6 мм після розмагнічування та витримки впродовж 1 місяця

Тому у подальшому всі зразки, які мали намагнічування розмагнічували та залишали на витримку по схожій методиці. На реальному об'єкті при визначенні «небезпечних ділянок» і наявності намагнічування доцільно також провести попереднє розмагнічування перед вимірюванням магнітних полів. Час витримки необхідно встановлювати експериментально, в залежності від оточуючої магнітної обстановки.

4.4. Дослідження ділянок в переддефектному стані з використанням магнітометричного приладу

Для дослідження було використано зразки які було значно деформовано шляхом багатократного вигину чи статичним вдавлюванням кульки діаметром 15 мм.

Частина зразків містила місцеві надрізи, яки грали роль зародку втомленої тріщини. Зразки було виготовлено з квадратного профілю різного перетину та прямокутної труби також різного перетину із стінкою завтовшки 2 – 3 мм.

При необхідності зразки розмагнічували та витримували впродовж місяця для природнього намагнічування. Кожного із зразків було виготовлено не менш ніж по 3 екземпляри і результати вимірювання приводяться на підставі середніх значень, отриманих для однотипних зразків.

Приклад частини зразків з квадратного профілю та труби наведено на рис. 4.40, 4.41.



Рис. 4.40. Приклад зразків з квадратного профіля для дослідження переддефектного стану


Рис. 4.41. Приклад зразків з труби для дослідження переддефектного стану

Магнітне поле для суцільного зразку з різним ступенем пластичної деформації наведено на рис. 4.42.

Як видно з рис. 4.42 та 4.43, із зростанням ступеня пластичної деформації зростає збурення магнітного поля поблизу зони у переддефектному стані і зміна магнітного поля стає все більш помітною. При наявності зародку тріщини (остання переддефектна стадія пластичної деформації) характер розподілу магнітного поля різко змінюється. Така картина повторюється для всіх зразків із схожими параметрами. Це дозволяє стверджувати, що прилад дає змогу досить точно розрізнити помірну пластичну деформацію від початкової стадії руйнування.

Зразки з труби використовувалися для дослідження впливу геометрічної форми перерізу на чутливість приладу до виявлення зон із значною пластичною деформацією. Пластична деформація створювалася на однієї із стінок труби шляхом або накернювання точок, або статичного вдавлювання шару. Досліджувалося магнітне поле як у зоні пластичної деформації так і на бічних стінках труби, в зоні, яка безпосередньо примикає до цієї ділянки.

Магнітне поле для зразків із зародком тріщини показано на рис. 4.42.

Магнітне поле на стінці з пластично деформованою зоною подібне до отриманих раніше на пласких зразках, тому ми не будемо наводити його. А магнітне поле на бічних стінках більш цікаве, бо ілюструє можливості визначення ділянок які були втягнути в процес пластичної деформації, що відбувався на іншій стінці профіля.







Рис. 4.42. Магнітне поле суцільних зразків із різним ступенем пластичної деформації: а – мінімальна деформація; б – середня деформація;

в – значна деформація із подовженням тріщини









Як свідчать рис. 4.44 та 4.43 при навіть примикаючи до зони пластичної деформації ділянки, які було втягнуто в процес пластичної деформації мають локальні збурення магнітних полів поблизу ділянки з пластично деформованим металом. Це дає змогу визначати переддефектний стан ділянок металоконструкції з профіля розвинутого перетину при неможливості доступу до окремих його ділянок. Така можливість є дуже важливою при обстеженні реальних металоконструкцій.



Рис. 4.44. Магнітне поле для бічної стінки труби в якої примикаюча стінка статично деформована шаром 15 мм



Рис. 4.45. Магнітне поле для бічної стінки труби в якої примикаюча стінка деформована за допомогою керна

Вид та протяжність зони збурення магнітного поля добре корелює з розмірами та ступенем пластичної деформації відповідної ділянки примикаючої стінки.

4.5. Засоби поліпшення візуалізації відображення інформації про досліджувані ділянки ОМПН

Наведені раніш картини магнітної індукції обстежених зразків мають один суттєвий недолік. Вони потребують певного досвіду для визначення дефекту та його типу, або типу переддефектного стану, бо містять три окремі графікі індукції магнітного поля в декартових координатах. Зважаючи на розбіг між значеннями по різних координатах на 1-2 порядки, візуально відстежити появу «дефектів» поля доволі складно. Тому природнім є потреба у вдосконаленні способу візуалізації результатів вимірювання магнітного поля, задля більш впевненого, а бажано і автоматичного розпізнавання дефектного стану.

Розглядаючи фізику процесу формування магнітного поля навкруги ділянок ОМПН із дефектами, або значно пластично деформованими, можна зазначити, що магнітні лінії, які формуються внаслідок впливу зовнішніх магнітних полів, перш за все магнітного поля землі, відхиляються від «нормального» напрямку саме у цих ділянках. Тобто, якщо представити вектор магнітного поля, який виходить з точки, де проводиться вимірювання, то в місці перебування дефекту він змінює свій модуль або напрямок, або і те і інше відразу. Графічно для випадку лінійного сканування це можна проілюструвати наступним чином (рис. 4.46).

Однак тривимірне зображення не дуже зручно використовувати, бо в залежності від положення системі координат частина інформації може втрачатися. До того ж необхідний набагато більший обсяг обчислень та спеціалізоване програмне забезпечення, створення якого є досить нетривіальною задачею.

Тому було обрано більш простіший та надійніший спосіб поліпшення візуалізації результатів. В основу цього способу покладено побудову графічного відображення зміни відстані між кінцем вектору магнітної індукції для сусідніх точок досліджуваної ділянки.

Приклади візуалізації для типових дефектів показано на рис. 4.47 - 4.52



Рис. 4.46. Графічна ілюстрація зміни вектору магнітного поля в місці точкового дефекту



Рис. 4.47. Відстань між кінцями вектору магнітної індукції для наскрізної тріщини



Рис. 4.48. Відстань між кінцями вектору магнітної індукції для шва з великим непроваром



Рис. 4.49. Відстань між кінцями вектору магнітної індукції для якісного шва



Рис. 4.50. Відстань між кінцями вектору магнітної індукції для статично деформованої ділянки



Рис. 4.51. Відстань між кінцями вектору магнітної індукції для невеликого ступеня пластичної деформації з надрізом



Рис. 4.52. Відстань між кінцями вектору магнітної індукції для деформованої згином ділянки без тріщини



Рис. 4.53. Відстань між кінцями вектору магнітної індукції для початку розвитку тріщини внаслідок великої деформації

Запропонований спосіб візуалізації дозволяє більш впевнено визначати дефектні ділянки. Також для нього стає можливим автоматичне визначення дефекту, який може бути описано як вейвлет певного типу. Але розробка такої системи виходить за межі нашого дослідження і потребує збору значної кількості статистичних даних.

4.6. Рекомендації по використанню приладу

1. Ділянку конструкції перед обстеженням треба зачистити від багатошарового покриття, якщо воно має товщину понад 1 мм, або частково відшаровується. Від лакофарбового покриття, окисних плівок і т.п., які щільно скріплені з металом і мають товщину 0,5 мм та менше ділянку можна не зачищати.

2. Конструкція повинна бути зачищеною від бруду та сухою. При температурі поза межами 0 - 30 ⁰C обстеження небажане.

3. Перевірити загальний рівень намагнічування на ділянці. При наявності ділянок із великим значенням магнітної індукції, яке визиває «переповнення» приладу, відкласти обстеження та ретельно розмагнітити ділянку. Перевірити рівень магнітного поля після розмагнічування. При необхідності провести повторне розмагнічування в іншій площині.

4. Після розмагнічування повторне обстеження проводити не раніше 1 тижня і не пізніше 1 місяця. Час витримки визначається експериментально.

5. Створити схему ділянки конструкції, яку обстежують. Позначити на ній вірогідні місця та геометрію дефектів.

6. Обрати найбільш доцільне розташування ліній сканування. Вони повинні бути розташовані поперек вірогідних дефектів.

7. Підготувати прилад. Перевірити працездатність карти пам'яті, заряд джерела живлення, працездатність приладу на контрольному зразку. Очистити картку пам'яті.

8. Підготувати блокнот для ведення робочих записів. Записати поточну дату, час обстеження, замалювати схему ділянки з позначенням напрямку сканування, кроку між лініями. Пронумерувати їх.

9. Увімкнути прилад. Почекати 5-10 секунд для його самотестування. На екрані повинен зявитися напис "Ready". У випадку коли на екрані з'явиться повідомлення про помилку необхідно перевірити картку, джерело живлення, можливо повторно вимкнути та увімкнути прилад. В деяких випадках може знадобиться повторне його програмування. 10. В залежності від умов обстеження увімкнути підсвітку (кнопка Lt), чи працювати без неї. Увага! Використання підсвітки зменшує час автономної роботи приладу.

11. Встановити прилад на першу лінію сканування і почати вимірювання.

12. Провести сканування вздовж обраних ліній сканування спочатку в одному напрямку, потім в перпендикулярному. Фіксувати для кожної лінії поряд з її номером ім'я файлу, куди відбувається запис.

13. Під час сканування вести датчик з постійною швидкістю плавно, зберігаючи обраний напрям руху та позиціонування датчику. При будь-яких помилках, просканувати лінію повторно.

14. Слідкувати за даними на екрані приладу. Значення магнітної індукції повинні змінюватися в межах -4096 - +4096. Якщо значення виходять за ці межі треба розмагнітити ділянку, або перевірити справність приладу.

15. Після обстеження ділянки, перенести дані з картки на інший носій, та очистити картку. Небажано тривалий час зберігати дані на картці, або проводити повторне обстеження, не скопіював результати попереднього на інший носій. Вірогідність створення файлу з ім'ям вже існуючого досить мала, але вона існує.

16. Обробити за допомогою ПК результати обстеження та зробити висновок про стан ділянки, або повторно обстежити всю, чи частину ділянки, змінивши крок та напрям ліній сканування.

Висновки до розділу 4

 Розроблений прилад має модульну структуру і кожна з цого частин може бути легко замінена, що є значною перевагою. Прилад виконує вимірювання індукції магнітного поля на поверхні зразка рівня ± 1,3 – 8 Гс з точністю 5 мГс. Ці характеристики дозволяють надійно визначати дефекти, що пов'язані із різким зменшенням перетину та місця, де пройшла пластична деформація.

2. Збереження даних у цифровій формі та наявність картки пам'яті підвищують стійкість приладу до зовнішніх перешкод і спрощують подальшу обробку даних. Малі габаритні розміри (55x105x40 мм) та вага (135 г), а також живлення від автономного джерела спрощують обстеження металоконструкцій.

3. Випробування на зразках довели здатність приладу ідентифікувати дефекти типу пора, тріщина, непровари у зварних швах, а також ді-

лянки із металом, що був значно пластично деформований і досяг межі пластичності, що дозволяє визначати зону у переддефектному стані.

4. Якщо металоконструкція має попереднє намагнічування до рівня, який перевищує межу вимірювання, її необхідно розмагнітити і витримати до появі в ній власного магнітного поля нормальної інтенсивності.

5. Застосування декількох способів візуалізації результатів вимірювання дозволяють більш впевнено ідентифікувати різні типи дефектів, і цей напрямок дослідження потребує продовження.

Перелік посилань до розділу 4

- Бабич Н. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования / Н. Бабич, И. Жуков. М.: МК-Пресс, 2004. - 576 с.
- 2. Банци М. Arduino для начинающих волшебников / М. Банци. М.: Рид Групп, 2012. 128 с.
- Блум Джереми Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства / Дж. Блум – М.: BHV, - 2016. - 336 с.
- 4. Кравченко А. 10 практических устройств на AVR-микроконтроллерах. Книга 3 (+ CD) / А. Кравченко. М.: МК-Пресс, 2011. 416 с.
- Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino / У. Соммер Издательство. – М.:BHV, 2012. - 448 с.
- Шонфелдер Г., Шнайдер К. Измерительные устройства на базе микропроцессора Atmega / Г. Шонфелдер. – СПб.: BHV, 2012. - 288 с.

3 M I C T

Розділ 1. ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ ОМПН ТА ІСНУЮЧИ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДДЕФЕКТНОГО СТАНУ	5
1.1.1. Оцінка рівня напруженості Оміті на приклаої кранів	0
MOCMOBOZO muny	0
1.1.2. Характерні бефекти металевих конструкци	15
	13
1.2. Георетичні уявлення про настання переддефектного стану	20
1.3. Закономірності зміни фізико-механічних характеристик	22
матеріалу в процесі малоциклового навантаження	23
1.4. Способи визначення небезпечних зон	
Висновки до розділу І	56
Перелік посилань до розділу 1	57
 ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ. 2.1. Розвиток кінетичної картини утворення нового структурного рівня в схемі накопичення пошкоджуваності в системі. 2.1.1. Фрактальна модель ісрархічно супідрядного процесу накопичення пошкоджуваності. 2.1.2. Особливості стохастичного опису. 2.1.3. Перколяційна феноменологія накопичення пошкоджуваності. 2.2. Синергетика утворення структурного рівня 	63 66 76 81 83
2.2.1. Термодинамічні закономірності прояву взаємодіючих	
процесів обурень, що накопичуються	83
2.2.2. Навантажуваний матеріал як синергетична система	86
2.3. Просторово-часова топологія процесу накопичення	
пошкоджуваності	93
2.3.1. Формування часової топології	94
 2.3.2. Формування просторової топології 2.3.3. Узгодження топології і кінетики процесу пошкоджаності систами 	100
234 Прояви критичності стану структури системи	114
Висновки по розділу 2	126
Перецік посидаці до розділу 2	127
перелік посилапь до розділу 2	12/

Розділ З. ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНИХ МЕТОДІВ	
ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ДЕФЕКТІВ ТА ОЦІНКИ	
СТАНУ ОМПН	.131
3.1 Існуючі методи визначення напружено-деформованого	
стану з використанням магнітометрії	.131
3.2. Рішення з використанням індуктивних датчиків для	
магнітометричної оцінки залишкового ресурсу	
металоконструкцій	.151
3.2.1. Магнітна система у вигляді С-подібного постійного	
магніту	.152
3.2.2 Магнітна система у вигляді стрижневого	
прямокутного постійного магніту	.158
3.3. Методика розрахунку ланцюга намагнічування пари	
«магнітна головка-профільний носій» при створенні	
інформаційних джерел для систем діагностики	.164
3.4. Поле мітки, нанесеної на феромагнітну конструкцію	
методом перпендикулярного магнітного запису	.172
3.5. Удосконалення конструкції ферозондів для діагностики	
металоконструкцій	.179
3.5.1. Імпульсний ферозонд при вимірюванні слабких	
магнітних полів	.179
3.5.2. Перехідні процеси в ферозондових датчиках з	
циліндричними магнітопроводами з урахуванням	100
впливу вихрових струмів	.183
3.5.3 Метод розрахунку вихідної напруги ферозондового	
датчика з циліндричним магнітопроводом в	100
усталеному режимі	.190
3.6 Розроблені технічні рішення для побудови пристроїв для	100
діагностування технічного стану конструкцій	.192
Висновки до розділу 3	.211
перелік посилань до розділу 3	.211

Розділ 4. ПРИЛАД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕЛЛЕФЕКТНОЖИВЛГО СТАНУ

ПЕРЕДДЕФЕКТНОЖИВЛІ О СТАНУ	
МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ	215
4.1. Опис апаратної частини приладу	215
4.2. Опис програми управління приладом	230
4.3. Тестування приладу на зразках	234
4.3.1. Визначення впливу стану поверхні на чутливість	
приладу	234
· ·	

4.3.2. Визначення впливу позиціонування датчику та	
швидкості його переміщення на чутливість прилад	<i>y</i> 238
4.3.3. Визначення впливу типу та розташування	
дефектів на чутливість приладу	240
4.3.4. Вплив попереднього намагнічування на	
чутливість приладу	249
4.4. Дослідження ділянок в переддефектному стані з	
використанням магнітометричного приладу	252
4.5. Засоби поліпшення візуалізації відображення	
інформації про досліджувані ділянки ОМПН	257
4.6. Рекомендації по використанню приладу	261
Висновки до розділу 4	262
Перелік посилань до розділу 4	
· · ·	

Наукове видання

МАРЧЕНКО Дмитро Миколайович СМИРНИЙ Михайло Федорович БОЙКО Григорій Олексійович ЖИДКОВ Андрій Борисович

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДДЕФЕКТНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Монографія

Друкується в авторській редакції

Оригінал-макет Могильна О.В.

Підписано до друку 31.01.2017. Формат 60х84 ¹/₁₆. Папір типогр. Гарнітура Тітеs. Друк офсетний. Умов. друк. арк. 15,6. Обл.-вид. арк.17,9. Тираж 100 екз. Вид. № 3097. Замов. № Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р. Адреса університета: просп. Радянський 59-А м. Сєвєродонецьк, 93400, Україна e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com.