

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Марченко Д.М., Жидков А.Б.

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ
ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ
ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ**

Монографія

Сєвєродонецьк, 2016

УДК 519.2:330.:658.5

М 30

Рекомендовано Вченою радою
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Рецензенти:

Носко П.Л., доктор технічних наук, професор кафедри машинознавства
Національного авіаційного університету.

Горбунов М.І., доктор технічних наук, професор кафедри залізничного,
автомобільного транспорту та ПТМ СХУ ім. В.Даля

Марченко Д.М.

М 30 **Теоретичні основи створення системи автоматизованого управління ризиком для об'єктів машинобудування підвищеної небезпеки:** монографія / Д.М. Марченко, А.Б. Жидков. – Сєвєродонецьк: Вид-во СХУ ім. В.Даля, 2016. – 176 с.

ISBN 978-617-11-0083-1

В монографії викладено основні поняття управління ризиками при експлуатації технічних систем та моделі для побудування автоматизованої системи управління ризиками, на основі реалізації комплексу узгоджених заходів щодо забезпечення прийняттого рівня ризику, а також оцінки стійкості деградаційних процесів в елементах об'єктів машинобудування підвищеної небезпеки.

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

ISBN978-617-11-0083-1

УДК 519.2:330.:658.5

© Марченко Д.М., Жидков А.Б.

© Східноукраїнський національний
університет імені Володимира
Даля, 2016

ВСТУП

Монографію присвячено дослідженням, що спрямовані на вирішення проблеми, яка полягає у підвищенні ефективності функціонування технічних систем (ТС) та виключення відмов в їх роботі шляхом забезпечення їх безпечної та ресурсозберігаючої експлуатації на основі розробки і реалізації комплексу узгоджених заходів щодо забезпечення прийняттого рівня ризику, а також оцінки стійкості деградаційних процесів в елементах ТС.

В даний час надзвичайно гостро стоїть питання визначення пріоритетів і вироблення ефективної технічної політики у сфері гнучкого управління ресурсом безпечної експлуатації ТС. Це вимагає нетрадиційних підходів і використання не тільки попереднього досвіду і відомих технічних рішень, але і нових ідей. Важливо забезпечити безпечну експлуатацію ТС при прийнятних економічних витратах. При цьому на передній план виступають оцінні методи, які передбачають ухвалення рішення на основі концепції ризику.

Це перш за все вимагає створення високоефективного організаційно-технічного механізму управління безпечною експлуатацією ТС, забезпечення ефективності їх функціонування, тобто результативної системи безпеки, орієнтованої на вимоги споживача (замовника) і адаптованої до вимог міжнародних стандартів шляхом формування єдиних підходів до безпеки.

Системний науково-технічний супровід і забезпечення тривалих термінів безпечного функціонування ТС вимагає крім того розвитку теоретико-методологічних основ концепції безпеки ТС на основі нових наукових знань в області безпеки та теорії катастроф. Це визначає міждисциплінарний підхід до аналізу безпеки і вказує на необхідність розгляду її з різних точок зору, але єдиних в діалектичному контексті сутності безпеки, що дозволить створити інтегральний ефект при вирішенні проблеми.

Слід підкреслити, що довгий час не тільки в Україні, але й в усьому світі причинно-наслідковий зв'язок між техногенною безпекою і економічними аспектами експлуатації ТС ігнорувався. Програми експлуатації не оцінювалися ні в контексті катастроф, ні з погляду дії катастрофи на програми експлуатації ТС, ні з погляду того, чи підвищать намічені

програми експлуатації ТС вірогідність катастроф і чи не зможуть ці програми підсилити руйнуючу дію катастрофи.

Умовами ризику руйнування вважаються обставини, в яких результат рішення має стохастичний, невизначений характер, тобто не є однозначно визначений. У цьому випадку для формальних постановок задач є важливим поняття міри ризику, з точки зору економічного його еквіваленту. Допустимі відхилення величини ризику визначаються тим фактом, що додаткова безпека вимагає відповідних фінансових витрат.

Зауважимо, що методологічно важливо розділити підходи для прийняття рішень у залежності від специфіки відповідних задач. У проблемах, де результати не мають критичного характеру, а рішення приймаються часто, можна обмежитися традиційними постановками задач стохастичної оптимізації, тобто оптимізувати середні значення певних величин (прибутки, збитки), ймовірність відмов, тощо. Інакше, зважаючи на потенційно критичний характер наслідків при прийнятті рішень, крім середніх значень певних величин, приймають до уваги і значення деяких мір ризику. Тобто рішення приймаються за двома критеріями – зиск-ризик, де в якості зиску враховуються середні значення зиску (прибутку), а в якості ризику – відповідна міра ризику. Це робить отримані рішення більш надійними (обережними) щодо їх потенційних наслідків.

Між тим, сьогодні катастрофи продовжують розглядатися, в основному в контексті реагування на них в рамках класичної теорії вірогідності.

Інтуїтивно вважалось, що катастрофа виникає в результаті практично неімовірного поєднання великого числа несприятливих обставин і що безпеку можна забезпечити навіть у разі гранично небезпечних технологій, якщо будуть створені адекватні організаційні структури і належним чином підготовлений персонал. Такого роду погляди базуються на теорії вірогідності.

В рамках класичної теорії вірогідності легко пояснюється мала вірогідність виникнення крупної аварії і катастрофи, які супроводжуються великим збитком, від його величини.

На основі цих уявлень розроблено багато нормативних документів, якими керуються при створенні проектів техногенно небезпечних об'єктів. У цих проектах передбачається можливість виникнення проектних аварій, до яких потрібно бути готовим завжди. Невелику частку можливих аварій відносять до запроектних, і лише нікчемний відсоток — до гіпотетичних аварій, які, швидше за все, не відбудуться. Про такі аварії говорять, що якщо вони і можуть траплятися, то не частіше одного разу в тисячу або в сто тисяч років.

До такої гіпотетичної аварії відносилася, наприклад, аварія, що відбулася у 1998 році у Німеччині в результаті розриву бандажу колеса надшвидкісного електропотягу ICE1, коли майже 100 пасажирів загинуло, при цьому було нанесено матеріальних збитків на 500 мільйонів євро. Вірогідність її виникнення вважалася рівною десять в мінус сьомому ступені. Такою вірогідністю аварій, звичайно, нехтують, вважаючи їх практично неможливими. Проте аварія відбулася. У житті відбулося те, що було майже неймовірним.

Істотний недолік тут полягає у тому, що крупні аварії і катастрофи знаходяться «на хвості» розподілу вірогідностей надзвичайних ситуацій за розміром збитку. Їх частота надзвичайно мала. Отже, існує дуже велика статистична невизначеність прогнозу. Відносні погрішності вірогідності подій, що відносяться до «хвостів» розподілів, можуть складати сотні відсотків.

Лише теорія ризику, що враховує, що в складній системі з численними зв'язками елементів включається новий чинник – нелінійна динаміка системи (система набуває синергетичного характеру), – здатна пояснити можливість антиінтуїтивної поведінки системи. Ця теорія здатна дати пояснення, тому що джерела небезпеки лежать не тільки в помилках операторів або ненадійності окремих елементів ТС, а в основі самих складних технологій, що включають безліч взаємозв'язаних елементів. Можливість виникнення аварій — це не властивість окремих частин системи, а властивість цілого. Така система здатна породжувати дуже складні залежності кінцевого стану від початкового її стану, що зумовлює необхідність враховувати таку фундаментальну категорію, як стійкість.

Взагалі, поняття стійкість і ризик є фундаментальними категоріями системних досліджень, тому для отримання науково-обґрунтованого рішення щодо будь-яких процесів, що пов'язані з деградацією ТС, слід проаналізувати універсальні процеси, відповідальні за втрату стійкості системи і збільшення ризику раптового руйнування.

Між тим, в рамках концепції ризику залишаються некерованими джерела великих збитків, пов'язаних з реалізацією малоімовірних подій, особливо в тій їх частині, яка торкається збитків від катастрофічних ситуацій, оскільки при оцінці імовірності їх виникнення велика невизначеність – з одного боку, а, з іншого, – виникають непереборні складнощі з калькуляцією збитків (зокрема, тих, що пов'язані з людськими жертвами).

Тому тільки макроскопічний підхід, що визначається концепцією ризику, не може вважатися достатнім, оскільки він не виявляє таких важливих якостей поведінки системи, як градієнтні режими, пов'язані з

механізмами накопичення пошкодженості, множинністю і складністю процесів що протікають на мікрорівні.

Останні десятиліття, коли виявляються радикальні зміни у баченні природи аварій у бік множинності і складності протікаючих процесів, коли з'являються серйозні наукові праці, присвячені з'ясуванню причин і закономірностей появи порядку з хаосу, динамічній теорії інформації, синергетиці і синергетичним методам управління, теорії катастроф та іншим важливим питанням, потрібне певне переосмислення причин виникнення аварій і катастроф, процесів їх розвитку і, що дуже важливе, можливих шляхів запобігання катастрофам.

В даний час розвивається нова наукова філософія еволюції динамічних систем і, відповідно, нова філософія їх безпечної експлуатації. Окремі риси нової філософії виявляються, наприклад, в концепції детермінованого хаосу, що розвивається в нелінійній динаміці і в концепції ризику.

Головні досягнення цих теорій можна стисло резюмувати таким чином:

- доведено, що навіть дуже прості системи можуть проявляти випадкові властивості. Це в корінні поміняло уявлення про випадковість, яка, як передбачалося, може виникати тільки в системах з великим числом ступенів свободи;

- доведено, що хаос може народжуватися універсальними шляхами, незалежно від природи системи. Це видатне відкриття, підтвержене також експериментально, привело, зокрема, до створення методу ренорм-групи в теорії динамічних систем;

- знайдено, що випадковість може бути обумовлена як внутрішніми властивостями, так і зовнішніми чинниками. При цьому, досліджуючи часові ряди спостережуваних змінних, завжди можна відрізнити випадкову, стохастичну поведінку систем від детермінованого хаосу і тим самим встановити критичність процесу, що вивчається.

Таким чином, системний науково-технічний супровід і забезпечення тривалих термінів безпечного функціонування ТС вимагає розвитку теоретичних основ створення системи автоматизованого управління ризиком для об'єктів машинобудування підвищеної небезпеки на основі нових наукових знань в області безпеки складних технічних систем.

Виходячи з цих позицій матеріал, викладений у даній монографії, структуровано наступним чином.

У першому розділі представлені дослідження, які дозволяють з єдиних системних позицій підійти до розбудови стратегії управління ризиком безпечної експлуатації об'єктів машинобудування підвищеної

небезпеки (ОМПН) які виявляють вищезазначену специфіку, з точки зору практичної спрямованості отриманих результатів.

Відповідно до цього в першому розділі: визначені принципи розбудови стратегії управління ризиком при експлуатації ОМПН (підрозділ 1.1); процедури реалізації компонентів процесу управління ризиком (підрозділ 1.2); необхідний набір елементів, принципи і процедури інформаційного відображення об'єкту експлуатації (підрозділ 1.3) та представлено методологію управління ризиком (підрозділ 1.4).

У другому розділі описано формальні моделі призначення стратегій для дотримання вимог концепції управління ризиком. В даному розділі розв'язується задача вироблення стратегії забезпечення безпеки при технічному обслуговуванні ОМПН, орієнтованому на ризики. Для цього спочатку в підрозділі 2.1 визначаються і систематизуються основні принципи управління технічним станом ОМПН в процесі експлуатації, а потім в підрозділі 2.2 формулюється постановка задачі і обґрунтовується метод її рішення, який включає розробку стратегії прогнозуючого контролю при призначенні відновлюючих заходів, а також обґрунтовується критерій ефективності прогнозування, заснований на аналізі співвідношення коефіцієнтів готовності об'єкту експлуатації при використанні різних стратегій. У підрозділі 2.3 визначаються вимоги до формування процедури контролю в умовах концепції безпеки, орієнтованої на ризики.

В третьому розділі описана обумовленість динамічних нестабільностей просторових та часових ефектів ризику, які впливають на прийняття рішень щодо експлуатації ОМПН. У даному розділі ставиться задача дослідження динамічних характеристик ТС, як складних нелінійних деградуючих систем, на основі моделювання дисипативних структур, формування яких визначається фрактальними закономірностями. Результати дослідження даного розділу є найважливішою складовою в розробці методу контролю технічного стану об'єктів експлуатації з метою побудови і технічної реалізації стратегії ризику при управлінні безпекою ОМПН.

Матеріал цього розділу викладається у наступній послідовності. Спочатку аналізуються універсальні процеси, відповідальні за втрату стійкості ТС. При цьому, оскільки така оцінка проводиться, виходячи з перших принципів розбудови просторово-часової еволюції складних систем, то під безпечним станом системи розумітимемо збереження системою цілісності або здатність підтримувати власний гомеостаз, а значить, небезпечним станом вважається такий, що призводить до руйнування системи. Тобто розглядатимемо безпеку як явище, тотожне гомеостазису системи. В цьому випадку безпеку можна інтерпретувати як

стійкий стан структури складної системи, при якому в допустимих межах підтримуються параметри, істотно важливі для збереження властивостей цієї системи і виконання нею необхідних функцій. Цей етап досліджень відображено в підрозділі 3.1.

У підрозділі 3.2 представлено результати щодо обґрунтування методу аналізу закономірностей пошкодженості з погляду польової теорії, що представляє накопичення пошкодженості в системі турбулентною динамікою дефектних структур. При цьому, виходячи з принципів, що визначають загальні закономірності розвитку цього процесу, проведено дослідження, що встановлюють ізоморфізм аналізованої системи. В якості таких принципів виступають цілісність, ієрархічність і інтегративність. Цілісність полягає у тому, що зміна будь-якого компоненту системи впливає на всі інші її компоненти і приводить до зміни системи в цілому. Ієрархічність системи полягає у тому, що її може бути розглянуто як елемент іншої системи вищого порядку, і кожен її елемент, у свою чергу, є системою. Інтегративність обумовлює володіння системою властивостями, відсутніми у її елементів.

У підрозділі 3.3 приведені результати досліджень, що встановлюють універсальність механізмів коливально-хвильових процесів накопичення пошкодженості в деградуючій системі. Тобто еволюція системи представляється процесом зміни стану, що відображається в параметрах стійкості. Таким чином, змістовність досліджень на цьому етапі визначається процедурою виявлення якісної визначеності системи.

У підрозділі 3.4 на основі використання положень принципу скейлінга, введено параметр пошкодженості та розвинений метод контролю технічного стану системи по характеристиках просторово-часових змін параметрів системи в процесі її функціонування.

Вважаємо, що монографія буде корисна широкому колу фахівців, які працюють з ТС і діяльність яких пов'язана з визначенням їх передруйнівного стану та прийняттям рішення про продовження, або припинення експлуатації ОМПН. Також матеріали, що викладено в монографії мають певну цінність для науковців, що працюють в галузі безпечної експлуатації ТС.

УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

1.1. Принципи призначення стратегії управління ризиками при експлуатації ОМПН

У даному підрозділі проведено аналіз різних концепцій безпеки і на підставі цього зроблено висновок щодо наявності об'єктивних загальних закономірностей в проблемній області, пов'язаних з аваріями і техногенними катастрофами (пункт 1.1.1), що обумовлює необхідність розробки упереджуючих дій, які орієнтовані на управління ризиками.

Для вирішення практичних задач у цій сфері, разом з прийнятою стратегією ризику, важливе значення має правильний вибір доцільної міри безпеки, для чого у пункті 1.1.2. аналізуються способи оцінки ризику за критеріями «планування» та «підтвердження безпеки». обґрунтовується методологічний підхід до вибору прийнятного рівня ризику, та розбудовується нечітко-ймовірнісна метрика ризику (пункт 1.1.3).

1.1.1. Стратегія управління ризиком

В даний час вважається загальноновизнаним, що рівень безпеки в широкому значенні, який відповідає тому чи іншому стану суспільства, його науково-технічним, економічним, ресурсним та іншим можливостям, має стохастичну компоненту, оскільки визначається цілим рядом випадкових чинників [3, 15, 22, 23, 28].

З урахуванням цього, кажучи про рівень безпеки ОМПН, представляється цілком правомірним вживання словосполучення «рівень безпеки і ризику».

З точки зору концепції безпеки [73], будь-яку складну технічну систему слід вивчати з трьох основних позицій: надійності системи, живучості системи та її ефективності.

Послідовність виникнення несприятливих подій, що приводять до аварій, показана на рис. 1.1.

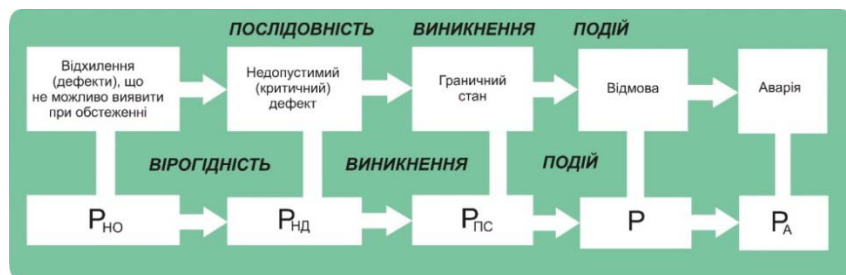


Рис.1.1. Схема розвитку критичної ситуації

Оскільки аварії - події рідкісні, і достовірної статистики відмов, що їх обумовлюють, по кожному з елементів обладнання немає, зазвичай при виробленні концептуальних основ безпеки робиться опора на сучасні погляди, що стосуються аналізу і оцінки ризику [51, 56, 74, 92, 115, 102].

Рівень безпеки і ризику, який задовольняє суспільство, вибір стратегії його забезпечення з урахуванням стану економіки, інвестиційних намірів щодо забезпечення технологічної стійкості тієї або іншої галузі, здійснюється, виходячи з певних принципів. На основі аналізу міжнародної і вітчизняної практики [7, 8 - 11, 14, 17, 19, 36, 50, 72, 65, 67, 78, 86, 112, 97] може бути названо декілька таких принципів.

До недавнього часу у світовій і вітчизняній практиці в основу концепції по забезпеченню будь-якого виду безпеки було встановлено принцип нульового ризику [69, 95] - ALAPA (аббревіатура від "As low as practicable achievable": «настільки низько, наскільки це досягне практично»), - тобто впровадження всіх заходів захисту і заходів щодо технічного обслуговування, які практично можуть бути здійснюваними. Ряд крупних аварій і катастроф техногенного характеру, у тому числі і на залізничному транспорті, виявили неправомірність такого підходу, зважаючи на неможливість досягнення абсолютної безпеки. Концепція абсолютної безпеки сьогодні признається неадекватною внутрішнім законам техносфери [2, 7, 41, 43, 65, 76, 98, 99]. Ці закони мають характер вірогідності, і абсолютна безпека досягається лише в системах, позбавлених запасеної енергії. [52, 65].

Вимога абсолютної безпеки, підкуплива своєю гуманністю, обертається трагедією для людей, тому, що забезпечити «нульовий ризик» в діючих системах принципово неможливо [101], і людина повинна бути орієнтованою на можливість виникнення небезпечної ситуації, тобто орієнтованою на певний - «прийнятний» - ризик: принцип ALARA (аббревіатура від “As low as reasonable achievable”: «настільки низько, наскільки це досяжно в межах розумного», враховуючи соціальні і економічні чинники) [33]. Тобто, якщо не можна створити абсолютно безпечні технології, забезпечити абсолютну безпеку, то, очевидно, слід прагнути до досягнення хоча б такого рівня ризику, з яким індивідуум і суспільство в цілому, в даний період часу може миритися (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Концепції безпеки і ризику

Через ці обставини у країнах Євросоюзу і США розпочався перехід від концепції «абсолютної безпеки» до концепції «стійкого розвитку», або «прийнятного ризику» [15, 31, 34, 53, 78, 98, 104, 105]. Ступінь впровадження цієї концепції в практичну діяльність сьогодні різний в різних країнах, а в деяких з них її введено у законодавство [114].

Слід відзначити, між тим наступне. Будь-яке управління припускає залежність керованого об'єкту від суб'єкта діяльності. Об'єкт, дії на який не призводять до запланованих змін в його стані, виправдано вважається некерованим. У концепції прийнятного ризику некерованими залишаються:

- частина джерел аварійних ситуацій в умовах недостатньої фінансової забезпеченості заходів щодо зниження ризику [6, 95];

- частина джерел малоімовірних катастрофічних збитків, оскільки при визначенні імовірності цих збитків непропорційно висока невизначеність [69], тобто концепцією використовується тільки макроскопічний підхід, при якому питання призначення техногенного ризику пов'язується лише з питанням доцільного балансу між масштабом матеріальних витрат і рівнем ризику з точки зору його економічного еквіваленту, та ігноруються детерміновані відносини у фізико-механічних процесах, що відбуваються у напруженому середовищі на мікромасштабі і фактична заміна їх імовірнісними подіями;

- джерела, пов'язані з організацією управління якістю на ремонтних підприємствах.

Тому перша з необхідних умов керованості ризику – приведення до якогось еквівалента всіх натуральних показників ризику.

Друга необхідна умова керованості ризику формулюється наступним чином: розділення сфер застосування концепцій прийнятного ризику і ППР.

Розстановку акцентів у розподілі витрат між різними напрямками робіт по управлінню ризиком зроблено в припущенні, що на підприємстві організовано роботу по управлінню якістю робіт. Практика демонструє зворотне співвідношення. Надійна техніка, а причини всіх серйозних проблем на виробництві – погана організація роботи по управлінню якістю [103]. З цього факту виходить третя необхідна умова керованості ризику – організація роботи на принципах управління якістю.

На додаток до задач, рішення яких необхідне для реалізації на практиці основних положень концепції ризику, необхідно сказати про те, які умови можна вважати достатніми при управлінні ризиком. Як і будь-який інший об'єкт, ризик за деяких умов може виявитися некерованим. Щоб запобігти втраті управління, необхідно точно уявляти собі, в чому, власне, втрата управління полягає.

З викладених вище міркувань виходять наступні принципи визначення стратегії управління ризиком ОМПН:

- неможливо досягти нульового ризику або абсолютної безпеки;

- прийнятний ризик поєднує в собі технічні, економічні, соціальні, політичні аспекти і представляє деякий компроміс між рівнем безпеки і можливостями її досягнення;

- економічні можливості підвищення безпеки технічних систем не безмежні. Витрачаючи надмірні засоби на підвищення безпеки, можна завдати збитку іншим сферам.

Для вирішення практичних задач у сфері забезпечення безпеки ОМПН важливе значення має наукове обґрунтування прийнятних рівнів ри-

зика і встановлення їх нормативних значень з урахуванням різних чинників ризику [32, 33, 63, 80, 99, 100, 105].

Ефективне впровадження концепції управління ризиком є частиною сталої виробничої практики на стратегічному рівні, а також засобом, що забезпечує поліпшення результатів виробничої діяльності залізничного транспорту. Тому достатньо різноманітна і структура документів в області управління ризиками, представлена на рис. 1.3 на прикладі ряду міжнародних і європейських документів [80]. Значення допустимого ризику нормується у відповідних документах, що регламентують безпеку.

Необхідно відзначити, що шкала ризику є порядковою [80], тобто значення має лише неперевершення рівня ризику, що обмежує область безпеки зверху, іншими словами, поріг ризику [57].

Грунтуючись на висловлених уявленнях про ризик [16, 28, 66], звернемося до принципів вибору доцільної міри рівня ризику.

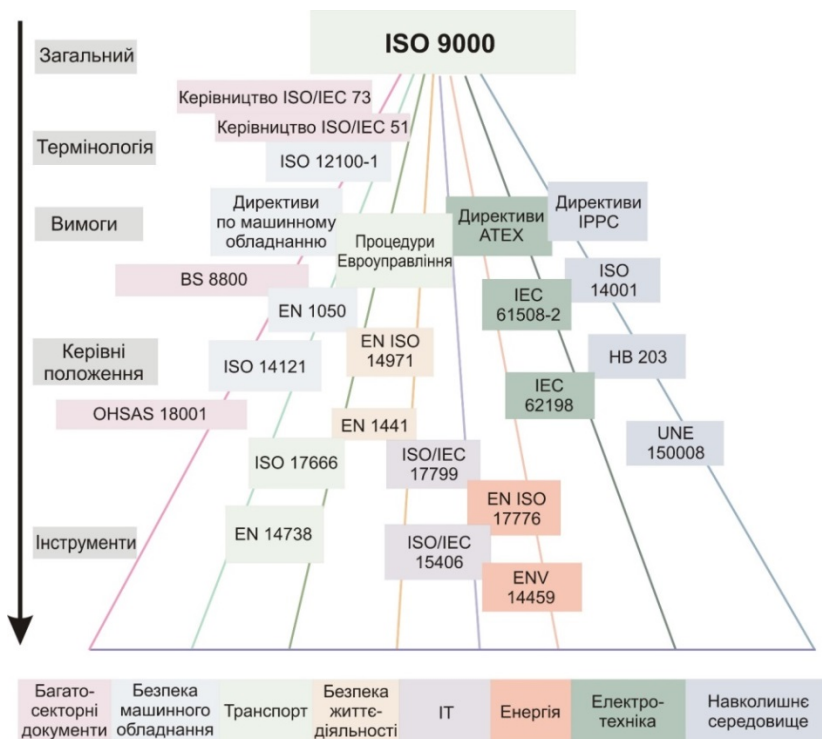


Рис. 1.3. Керуючі документи по менеджменту ризиків

1.1.2. Принципи планування і підтвердження безпеки

Звернемося до першої з умов керованості ризику, позначеної вище – вибір міри ризику.

Слід розрізняти дві ступені ризику, які відображають позиції індивідуума і суспільства у цілому [85].

Індивідуума перш за все цікавить ступінь його власної безпеки, яка позначається як індивідуальний ризик r_i і відповідає ймовірності смертельного результату для окремо взятої людини (за рік) [94]:

$$r_i = \sum_j w_j v_{ij} \lambda_{ij} ,$$

де w_j - ймовірність події j ; v_{ij} - ймовірність того, що i -та людина буде учасником події j ; λ_{ij} - вірогідність того, що i -й учасник при події j загине.

Суспільний ризик відображає позицію суспільства і орієнтований на кількість жертв, яку можна очікувати при експлуатації ОМПН (наприклад, протягом року). Суспільний ризик відповідає значенню, яке визначається за статистичними даними про аварії [94]:

$$R_o = \sum_j w_j A_j \varphi(A_j) = \varphi(A_j) \sum_i r_i$$

де w_j - вірогідність того, що відбудеться подія j ; A_j - число жертв при події j ; $\varphi(A_j)$ - коефіцієнт масштабності, переоцінюючий аварії зі збільшеним числом жертв. Це особливо важливо для оцінки масштабів аварій з великим числом жертв.

Прийнятний рівень ризику вибирається усередині інтервалу «межа ризику - мета ризику» (рис. 1.4) за наслідками соціально-економічного аналізу, що проводиться по схемі «зиск – ризик» (рис. 1.5).

Допустимі межі цього показника визначаються тим фактом, що додаткова безпека вимагає відповідних фінансових витрат [2]. В результаті питання призначення техногенного ризику переростає в проблему доцільного балансу між масштабом витрат і ризиком [36, 86].

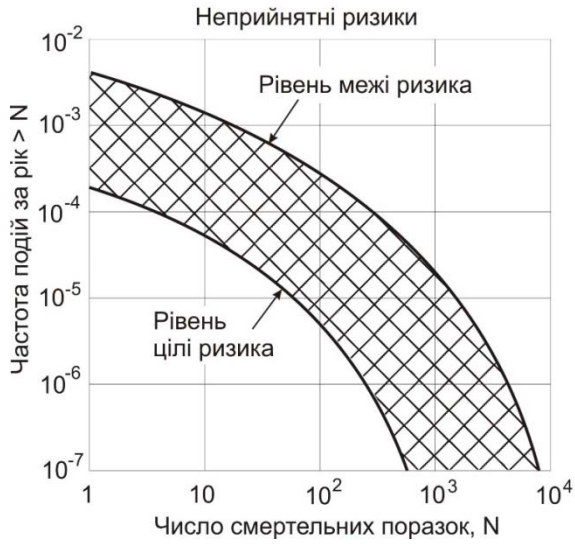


Рис.1.4. Схема вибору прийнятного рівня ризика

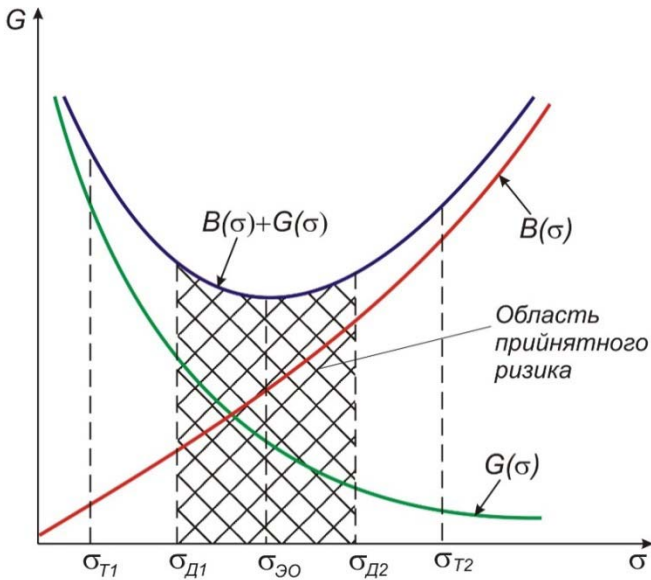


Рис. 1.5. Графічні залежності для обґрунтування рівня прийнятного ризика

Експлуатація будь-якої технічної системи представляється послідовністю її різних станів. Тому її технічний стан, можна представити у вигляді функції $\eta(t)$, що приймає значення, відповідні цим станам [18, 61].

Функціонал від функції $\eta_i(t)$ може бути узагальненим показником надійності $\varphi[\eta_i(t)]$. Але оскільки $\eta(t)$ - випадкова величина, то і функціонал i -ї реалізації $\varphi[\eta_i(t)]$ є, реалізацією випадкової величини $\varphi[\eta(t)]$. Тому узагальненим показником надійності R слід вважати математичне очікування випадкової величини $\varphi[\eta(t)]$, тобто

$$R = M[\varphi(t)]. \quad (1.1)$$

Вид функції $\eta(t)$ цілком визначається властивостями, що характеризують надійність, а функціонал φ визначається, виходячи з принципів оцінки наслідків відмов [12, 27].

Вид контрольованих параметрів надійності їх кількісна оцінка визначаються при цьому як [75]:

$$R = M[\varphi(t)] = \int_0^{\infty} \varphi(t) f(t) dt = \int_0^{\infty} \varphi'(t) P(t) dt, \quad (1.2)$$

де $f(t) = F'(t)$ - густина ймовірності розподілу часу безвідмовної роботи;

$F(t)$ - функція розподілу часу безвідмовної роботи;

$P(t) = 1 - F(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи;

$\varphi(t)$ - функція оцінки ризику.

Завдання виду функції φ засноване на практичних підходах до принципів визначення наслідків відмов конкретної технічної системи і умов її застосування.

Оскільки кількісний критерій для соціального ризику не піддається формалізації, скористаємося «нечіткими» моделями [12, 27].

1.1.3. Нечітко-ймовірнісна метрика ризику

Для отримання точкової оцінки значення ризику слід використувати добуток чисельних значень його складових: ймовірність P настання події та наслідки A небажаної події. Звідси ризик, відповідно до [1, 47, 106] визначається наступним чином:

$$R = A \cdot P. \quad (1.3)$$

Перехід до нечітких моделей припускає широкий спектр варіантів агрегації величини події і можливості її настання [1, 47, 48, 82]. Як один з можливих варіантів узагальнення для подібної моделі приймемо [45, 46, 106] заміну значень A і P в (1.15) на нечіткі числа (лінгвістичні змінні), а добуток – на розширений (за принципом узагальнення) добуток нечітких чисел.

Нечіткий аналіз використовує "функції приналежності" $\mu_B(x)$ для опису ступеню приналежності елементу x до нечіткої множини B [106] і розширені алгебраїчні операції алгебри, тобто операції з нечіткими числами відповідно до принципу розширення Заде [45]:

$$R = A \otimes P \Leftrightarrow \mu_g(z) = \max_{z=xy} \{ \min[\mu_A(x), \mu_P(y)] \}. \quad (1.4)$$

Тут R , A і P – нечіткі числа; $\mu_R(z)$, $\mu_A(x)$, $\mu_P(y)$ – функції приналежності, що характеризують ступені приналежності елементів z , x , y до нечітких множин R , A і P відповідно; \otimes – операція розширеного добутку нечітких чисел.

На рис. 1.6 зображено графік функції приналежності нечіткої множини і ієрархічна структура зв'язку між лінгвістичною змінною «величина A події» і «міра P можливості настання події», нечіткими обмеженнями на терм-множинах типу «дуже - не дуже», що представляють зміст її значень, і значеннями базової змінної, відповідної значенню первинного терму - «істинність», який ототожнюється з нечіткими обмеженнями на значення базової змінної.

Графіки функцій приналежності термів «Дуже можливо», «Можливо», «Малоймовірно», «Сумнівно», «Дуже малоймовірно» (цю терму надано з міркувань симетричності інтервалу), «Надзвичайно малоймовірно» лінгвістичної змінної «міра P можливості настання події» показано на рис. 1.7.

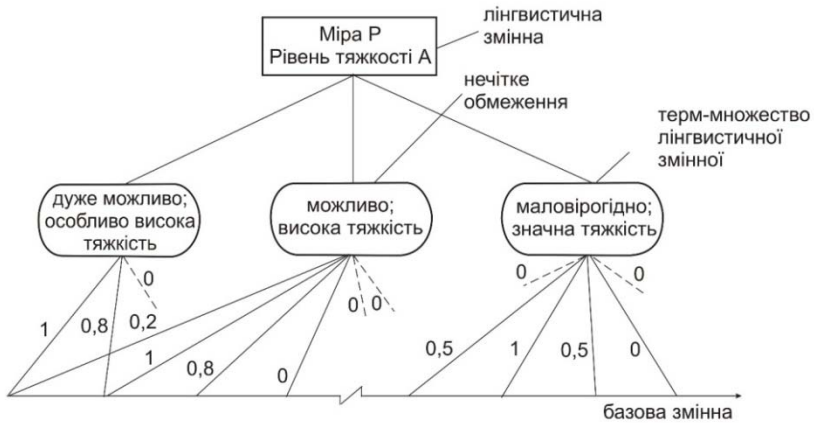


Рис. 1.6. Ієрархічна структура зв'язку лінгвістичної змінної і її нечіткими значеннями

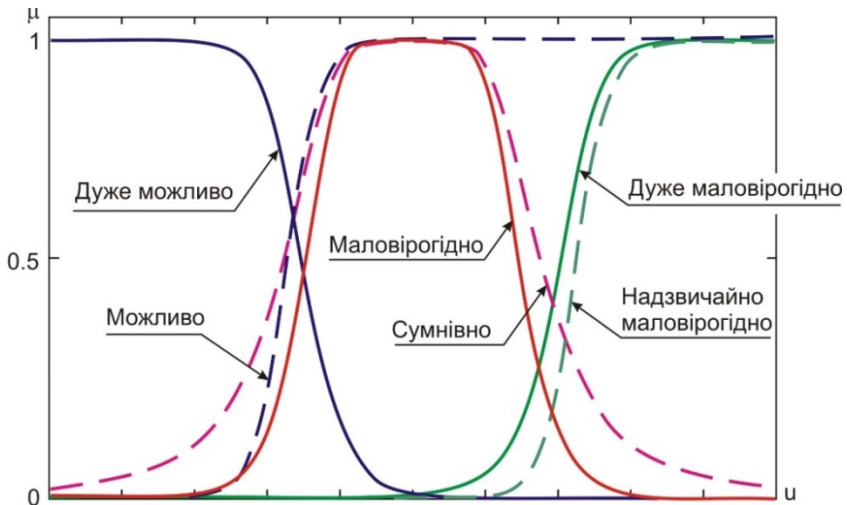


Рис. 1.7. Графік функції приналежності лінгвістичної змінної «міра можливості настання події P »

Залежно від імовірності настання негативних наслідків і ступеня їх тяжкості лінгвістичні терми класифіковано відповідно до [51, 57, 100] (табл. 1.1).

Класифікація тяжкості та ймовірності настання несприятливих наслідків

Позначення	Лінгвістичні терми	Ознаки
5	Особливо висока тяжкість	Смерть хоча б однієї людини й більше, або важкий матеріальний збиток і збиток навколишньому середовищу
4	Висока тяжкість	Травмування людей або нанесення значного матеріального збитку, викликані важким пошкодженням об'єкту експлуатації
3	Значна тяжкість	Матеріальний збиток, пов'язаний із матеріальними витратами і втратою часу для відновлення первинних характеристик об'єкту
2	Помірна тяжкість	Незначний збиток об'єкту експлуатації і навколишньому середовищу
1	Незначна тяжкість	Відсутність збитку, тимчасові незручності
E	Дуже можливо	Частота появи події більше 0,1
D	Можливо	Частота появи події більше 0,01, але менше 0,1
C	Малоймовірно	Частота появи події більше 0,001, але менше 0,01
B	Сумнівно	Частота появи події більше 0,0001, але менше 0,001
A	Надзвичайно малоймовірно	Частота появи події менше 0,0001

Міри відхилення D_{ij} функції приналежності ризику $\mu_{R_i}^k$, одержаної розрахунком, від функцій приналежності опорних значень ризику розраховуються наступним чином [1]:

$$D_{II}(R_i, \text{Високий}) = \left[\sum_{k=1}^6 (\mu_{R_i}^k - \mu_{\text{Високий}}^k) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{III}(R_i, \text{Средний}) = \left[\sum_{k=1}^6 (\mu_{R_i}^k - \mu_{\text{Средний}}^k) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{III}(R_i, \text{Низкий}) = \left[\sum_{k=1}^6 (\mu_{R_i}^k - \mu_{\text{Низкий}}^k) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{ij} = 1/[\min(D_{ij})], j = 1, 2, 3.$$

а ступінь довіри до того, що R_i належить до j -го реперного терму ризика [49]:

$$\beta_{ij} = \alpha_{ij} / \sum_{k=1}^6 \alpha_{ik}.$$

Оскільки значення вихідної нечіткої змінної «ризик» у правилі задане нечіткою множиною, то правило може бути представлене нечітким відношенням. Для нечіткого правила «якщо $x \in \tilde{A}$, то $y \in \tilde{B}$ », нечітке відношення \tilde{R} задається на декартовому добутку $U_x \times U_y$, де U_x, U_y - універсальна множина вхідної (вихідний) змінної. Розрахунок нечіткого відношення \tilde{R} здійснюється відповідно [45] наступним чином:

$$\mu_{\tilde{R}}(x, y) = \min[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)].$$

Для завдання багатовимірних залежностей «вхід-вихід» використовуватимемо нечіткі логічні операції «і» та «або». Зручно правила формулювати так, щоб усередині кожного правила змінні об'єднувалися логічною операцією «і», а правила у базі знань зв'язувалися операцією «або». В цьому випадку нечітку базу знань, яка ідентифікує причину (вхід $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$) і слідство (вихід Y), можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & \text{Якщо } (x_1 = a_{1,j_1}) \text{ і } (x_2 = a_{2,j_1}) \text{ і } \dots \text{ і } (x_n = a_{n,j_1}) \\ & \text{або } (x_1 = a_{1,j_2}) \text{ і } (x_2 = a_{2,j_2}) \text{ і } \dots \text{ і } (x_n = a_{n,j_2}) \\ & \dots \\ & \text{або } (x_1 = a_{1,j_k}) \text{ і } (x_2 = a_{2,j_k}) \text{ і } \dots \text{ і } (x_n = a_{n,j_k}), \end{aligned}$$

$$\text{то } y = d_j, j = \overline{1, m},$$

де $a_{i,jp}$ - нечіткий терм, яким оцінюється змінна X_i в строчці з номером jp ($p = \overline{1, k_j}$); k_j - кількість строчок, в яких вихід оцінюється значенням d_j ; m - кількість різних значень, використовуваних для оцінки вихідної змінної Y .

Залежність між добутком нечітких множин A і P і ризиком R , описує наступна нечітка база знань, відображена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Нечітка база знань

x_1	x_2	...	x_n	y
$a_{1,1,1}$	$a_{2,1,1}$	...	$a_{n,1,1}$	d_1
$a_{1,1,2}$	$a_{2,1,2}$	...	$a_{n,1,2}$	
...	
$a_{1,1,k_1}$	$a_{2,1,k_1}$	...	$a_{n,1,k_1}$	
$a_{1,2,1}$	$a_{2,2,1}$	...	$a_{n,2,1}$	d_2
$a_{1,2,2}$	$a_{2,2,2}$	...	$a_{n,2,2}$	
...	
$a_{1,2,k_2}$	$a_{2,2,k_2}$	...	$a_{n,2,k_2}$	
...				
$a_{1,m,1}$	$a_{2,m,1}$	...	$a_{n,m,1}$	d_m
$a_{1,m,2}$	$a_{2,m,2}$	...	$a_{n,m,2}$	
...	
a_{1,m,k_m}	a_{2,m,k_m}	...	a_{n,m,k_m}	

Нечітка база знань з урахуванням різного ступеня упевненості експертів в адекватності правил представляється таким чином:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} w_{jp} \right) \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m},$$

де \cup - нечітка логічна операція «або»; \cap - нечітка логічна операція «і»; $W_{jp} \in [0, 1]$ - ваговий коефіцієнт правила з номером jp .

Оскільки функції приналежності термів ризику мають вигляд, показаний на рис. 1.8, то нечіткі відносини, відповідні правилам бази знань (табл. 1.2), будуть такими як на рис. 1.9.

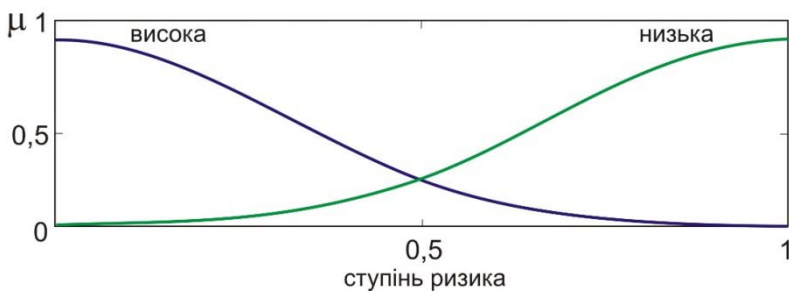


Рис. 1.8. Функції приналежності термів ризику

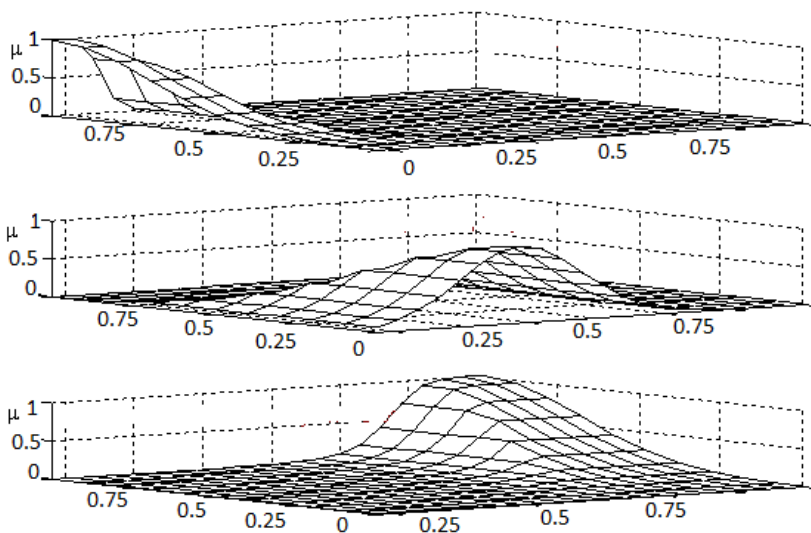


Рис. 1.9. Нечіткі відношення, що відповідають правилам табл. 1.3

Основна мета бази знань полягає в наданні інформації про рівень безпеки ОМПН. Використання експертного опитування і застосування лінгвістичних змінних в задачах оцінки ризику дає можливість визначення рівня безпеки для ОМПН в якісних категоріях.

Проте, перш ніж практична задача побудови системи управління безпекою ОМПН з урахуванням концепції ризику стане предметом реалізації, необхідно, крім створення необхідних теоретичних передумов, точно сформулювати і формалізувати етапи синтезу управління з урахуванням концепції ризику.

1.2. Процедури реалізації процесу управління ризиком

Планування безпеки, виконуване способом орієнтації на ризики, включає ряд послідовних етапів [20, 33, 57, 58, 59].

Ці етапи об'єднано в три основні групи: «аналіз ризику», «оцінка ризику» і «планування заходів».

У даному підрозділі представлено методологію управління ризиком, що містить процедури постановки задачі (пункт 1.2.1), ідентифікації ризику (пункт 1.2.2), аналізу ризику (пункт 1.2.3), оцінки ризику (пункт 1.2.4), планування заходів (пункт 1.2.5).

1.2.1. Процедура «постановка задачі»

Розглянемо логічну схему роботи системи управління ризиками (рис.1.10). Вона складається з декількох кроків (етапів)

Крок 1. Визначення мети і вимог до системи управління ризиками. На залізниці присутні два види діяльності, пов'язані з комерційною складовою діяльності по транспортуванню вантажів і соціальною складовою діяльності, пов'язаною з перевезенням пасажирів (у цій частині діяльності присутня і комерційна складова). Комерційна складова діяльності має на меті отримання прибутку. Соціальна - здійснення безпечного виробничого процесу. Система управління ризиками повинна забезпечити досягнення цих цілей.

У сукупності складових видів діяльності будь якого виробництва метою системи управління ризиками є забезпечення захищеності процесу використання ОМПН у виробничому процесі, при якому відсутній неприпустимий ризик виникнення аварій і їх наслідків, що спричиняють завдання шкоди життю або здоров'ю людей, шкоди навколишньому середовищу, майну фізичних або юридичних осіб і т.д.

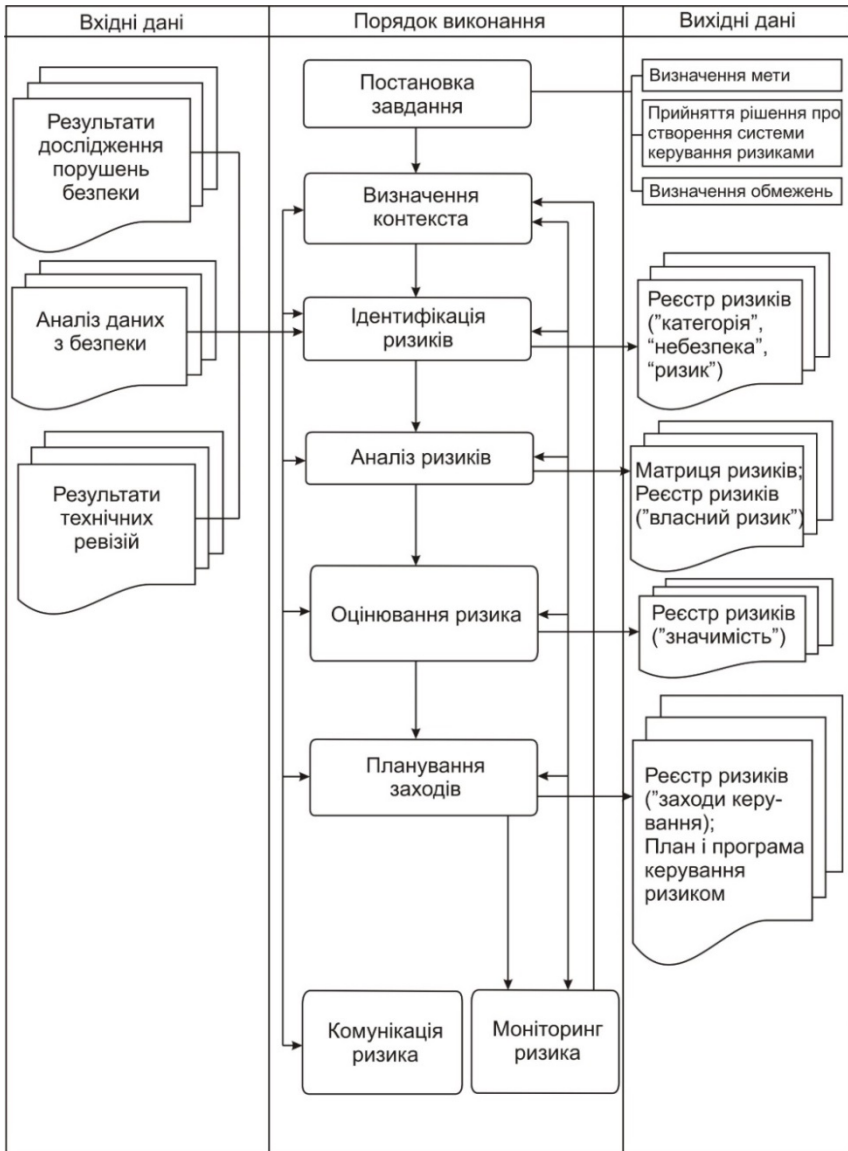


Рис. 1.10. Загальна схема системи управління ризиками

Крок 2. Визначення обмежень для системи управління ризиком. Будь-яка організація діє в умовах певних обмежень. Вони можуть бути обумовлені характеристиками зовнішнього середовища, або самої організації. Ці специфічні обмеження необхідно враховувати, про що було сказано вище.

Перші два кроки можна об'єднати поняттям «визначення контексту», тобто зовнішнього і внутрішнього середовища, в якому залізниця прагнуть досягти свої цілі. Зовнішній контекст представляє соціальне, правове, фінансове, технологічне, і конкурентне середовище на міжнародному, національному, регіональному або локальному рівні; ключові рушійні сили й тенденції; взаємостосунки із зацікавленими сторонами.

Внутрішній контекст включає організаційну структуру, стратегії ТОіР; можливості в частині ресурсів і компетентності; потоки інформації, інформаційні системи, процеси ухвалення рішень (формалізовані і неформалізовані); нормативні документи; договірні відносини і т.д.

1.2.2. Процедура «ідентифікація ризику»

Крок 3. Ідентифікація ризиків. Результатом даного етапу є максимально можливий перелік ризиків для безпеки ОМПН.

Методи ідентифікації безпеки (табл. 1.3 і табл. 1.4) в широкому значенні діляться на три категорії:

1) порівняльні методи, прикладом яких є відомості перевірок, індекси небезпек і огляд даних експлуатації [25, 37, 38];

2) фундаментальні методи [47, 90], які побудовано таким чином, щоб поєднувати експертні знання щодо задач ідентифікації і прогнозування шляхом постановки ряду питань типу «а що, якщо ...?». Прикладом даного типу методології є дослідження безпеки і пов'язаних з нею проблем (HAZOP [567]), а також аналіз видів і наслідків відмов (FMEA [489]) –«дерево відмов»;

3) способи індуктивного підходу [4, 6, 71, 103], такі як логічні діаграми можливих наслідків даної події («дерево подій»).

Розглянемо предметну область, в якій виділимо об'єкт безпеки O . У інформаційній області будується причинно-наслідкова модель ризику \bar{O} подій (дерево подій). Інформація щодо чинників безпеки X за допомогою семантичного оператора d_x відображається у структурі бази даних \bar{X} у вигляді функції приналежності безпеки X , що ідентифікується, до однієї з категорій Y тяжкості наслідків події і міри можливості її настання.

Таблиця 1.3

**Перелік найпоширеніших методів, що використовуються
при ідентифікації ризику**

Метод	Опис і застосування
Аналіз «дерева подій»	Сукупність прийомів ідентифікації небезпеки і аналізу частот, в яких використовується індуктивний підхід з метою переведення різних ініціюючих подій в можливі результати
Аналіз видів і наслідків відмов, а також аналіз видів, наслідків і критичності відмов	Сукупність прийомів ідентифікації головних джерел небезпеки і аналізу частот, за допомогою яких аналізуються всі аварійні стани обладнання на предмет їх впливу як на інші компоненти, так і на систему в цілому
Аналіз «дерева несправностей»	Сукупність прийомів ідентифікації небезпеки і аналізу частот небажаної події, за допомогою яких визначаються всі шляхи її реалізації. Використовується графічне зображення
Дослідження небезпеки і пов'язаних з нею проблем	Сукупність прийомів ідентифікації, за допомогою яких оцінюється кожна складова системи з метою виявлення того, чи можуть відбуватися відхилення від призначення конструкції і які наслідки це може спричинити
Аналіз впливу людського чинника	Сукупність прийомів аналізу частот в області дії людей на показники роботи системи, за допомогою яких визначається вплив помилок людини на безпеку
Попередній аналіз небезпеки	Сукупність прийомів ідентифікації небезпеки і аналізу частот, які використовуються на ранній стадії проектування з метою ідентифікації небезпек і оцінки їх критичності
Структурна схема безпеки	Сукупність прийомів аналізу частот, на основі яких створюється модель системи і її резервування для оцінки безпеки

Таблиця 1.4

Перелік додаткових методів, які використовуються при ідентифікації ризику

Метод	Опис і застосування
1	2
Класифікація груп ризику по категоріях	Класифікація видів ризику по категоріях у порядку пріоритетності груп ризику
Відомості перевірок	Складання переліків типових джерел потенційних аварій, які потребують розгляду. З їх допомогою можна оцінювати відповідність законам і стандартам

1	2
Загальний аналіз відмов	Метод, призначений для визначення того, чи можлива раптова відмова (аварія) ряду різних складових або компонентів системи, і оцінювання вірогідного сумарного ефекту
Моделі опису наслідків	Оцінка дії небезпеки на людей, майно або навколишнє середовище. Використовуються як спрощений аналітичний підхід
Метод Делфі	Спосіб комбінування експертних оцінок, які можуть забезпечити проведення аналізу частоти, моделювання наслідків та оцінювання ризику
Індекси небезпеки	Сукупність прийомів по ідентифікації/оцінці небезпеки, які можуть бути використані для ранжирування небезпек
Метод Монте-Карло й інші методи моделювання	Сукупність прийомів аналізу частоти, в яких використовується модель системи для оцінки варіацій в початкових умовах і допущеннях
Парні зіставлення	Спосіб оцінки і ранжирування сукупності ризиків шляхом попарного порівняння
Огляд даних експлуатації	Сукупність прийомів, які можуть бути використані для виявлення потенційно проблемних областей, а також для аналізу частоти, заснованих на даних про аварії, даних про надійність і інше
Аналіз прихованих процесів	Метод виявлення прихованих процесів і шляхів, які могли б привести до настання непередбачених подій

Інформація щодо категорій Y за допомогою семантичного оператора d_y відображається у структурі бази даних \bar{Y} у вигляді функцій приналежності одній з категорій ризику. Управляючий оператор r_x здійснює зв'язок інформаційного середовища та предметної області, тобто реалізує управляючу дію.

Розглянемо етап ідентифікації ризику (рис. 1.11), як ієрархічну процедуру наповнення матриці безпеки.

Якщо \bar{X} і \bar{Y} інтерпретувати як бази даних, то \bar{O} можна інтерпретувати як базу знань, яка ідентифікує небезпеку. У базі даних складають математичну конструкцію – функцію приналежності. А в базі знань зіставляють її з реперними термами небезпек і ризику. Семантичні датчики d_x , d_y і r_x є (використовуючи формалізм ультрасітої) ультраоперато-

рами. Виконавець r_x - це деяка абстракція, яка пов'язана з дією з інформаційного середовища на предметну область [3, 33, 67].

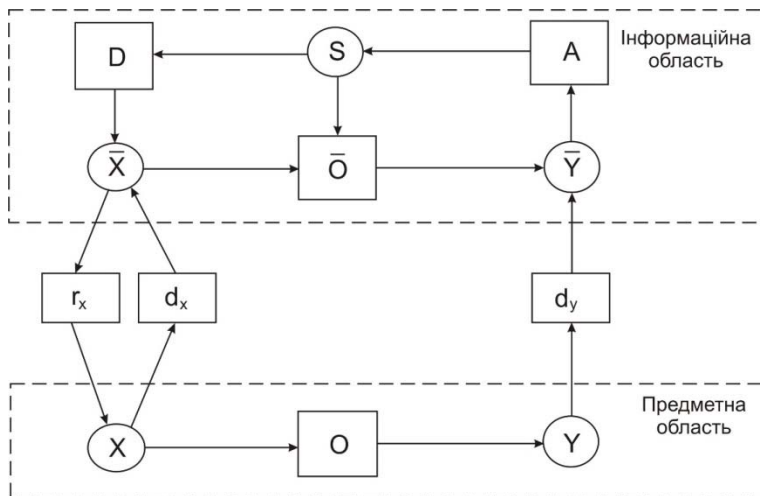


Рис. 1.11. Схема ідентифікації небезпеки

Якщо в базі знань \bar{O} , A , D є правила, які відображають (ідентифікують) причину (чинник небезпеки) в слідство (категорію ризику), або симптом в діагноз, а діагноз - в спосіб управління і реалізують активне спостереження за системою (моніторинг системи), то таку систему можна вважати управляючою системою, заснованою на знаннях або семантичною управляючою системою, що відображає семантику (відносини змінних) предметної області у вигляді чітких понять інформаційної області.

Для цього може бути використана матриця безпеки (табл. 1.5). Математично матриця описується таким чином:

$$M = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} \end{bmatrix}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (1.5)$$

де d_{ij} – експертна оцінка ступеня впливу конкретного дефекту вузла ОМПН на його комплексну безпеку; N – кількість груп експлуатаційних властивостей і елементів ОМПН; M – кількість груп ризиків спричинення шкоди. Функція d_{ij} є дискретною і визначається методом опитування групи експертів. Результати опиту приводяться до цілочисельних значень.

Таблиця 1.5

Матриця комплексної конструктивної безпеки ОМПН

Ризик	Оцінка впливу ОМПН на ризик спричинення шкоди					
	M_1	M_2		M_j		
Елементи ОМПН						
N_1	d_{11}	d_{12}	...	d_{1j}		
...		
N_i	d_{i1}	d_{i2}	...	d_{ij}		

У якості критерію безпеки ОМПН може використовуватися наступний показник комплексної системної безпеки,

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^j C_j \sum_1^j \left(\frac{d_i \cdot \beta_i}{M} \right)^2}, \quad (1.6)$$

де d_i – приватна оцінка впливу конкретного елемента ОМПН на ризик спричинення шкоди, одержана експертним методом; N – число рядків (елементів конструкції) в матриці безпеки; M – число стовпців (чинників небезпеки) в матриці безпеки; β_i – коефіцієнт, що враховує ступінь реалізації в конструкції ОМПН технічно можливого рішення, що забезпечує максимальну безпеку ОМПН; C_j – ваговий коефіцієнт, що враховує вплив конкретного елемента конструкції на конкретний ризик спричинення шкоди, який визначається як відношення приватної оцінки до суми всіх оцінок по конкретному ризику спричинення шкоди.

Приведемо приклад ідентифікації небезпек у вигляді дерева відмов для ОМПН.

Ситуацію з можливими небезпечними станами обладнання можна представити у вигляді дерева відмов, зображеного на рис. 1.12. Розглянемо описаний вище етап, який на діаграмі позначено римською цифрою I. Можлива відмова одного з виділених блоків, супроводжувана відповідним рівнем тяжкості наслідків (1, 2, ..., 5), характеризується відповідною категорією ризику, визначуваною на підставі функцій приналежності виділеної лінгвістичної терми, що ідентифікується, - рівню ризику.

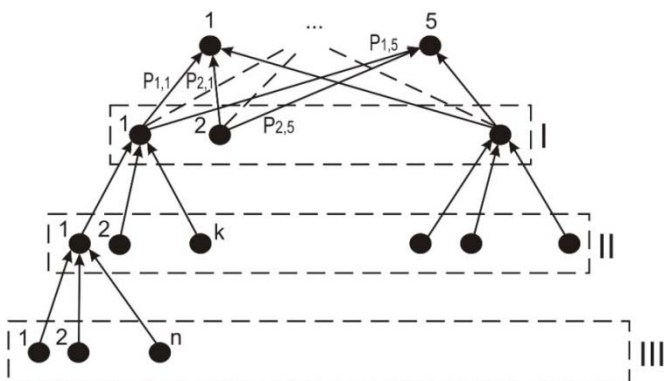


Рис. 1.12. Дерево відмов ОМПН



Рис. 1.13. Діаграма Іскави: чинники першого порядку («великі кістки»); чинники другого порядку («середні кістки»); чинники третього порядку («малі кістки»)

Слід зазначити, що одержана діаграма не може розглядатися як сукупність ізольованих шляхів ідентифікації небезпек, оскільки агрегати між собою залежні. Крім того, слід мати на увазі комплексність питання безпеки з погляду ефективності перевізного процесу, як одного з пріоритетних напрямів наукових досліджень в області системних стратегічних задач, оскільки є стрижнем економічного функціонування будь-якої галузі.

На рис. 1.13 представлено приклад причинно-наслідкової діаграми системної ідентифікації ризику ОМПН, побудованої за схемою Ісікави [35, 42, 79] (риб'ячий хребет, рис. 1.13).

Система безпеки представляється таким чином як багатоконтурна і багаторівнева система ієрархічного типу.

1.2.3. Процедура «аналіз ризику»

Крок 4. Аналіз ризику.

Аналіз прийнятих в світовій практиці менеджменту ризиків критеріїв прийнятного соціального ризику при підтвердженні безпеки, які суспільство так чи інакше допускає [51, 57, 64], дозволяє запропонувати наочну логарифмічну шкалу для градації мір можливості настання небезпечної події (рис.1.14):

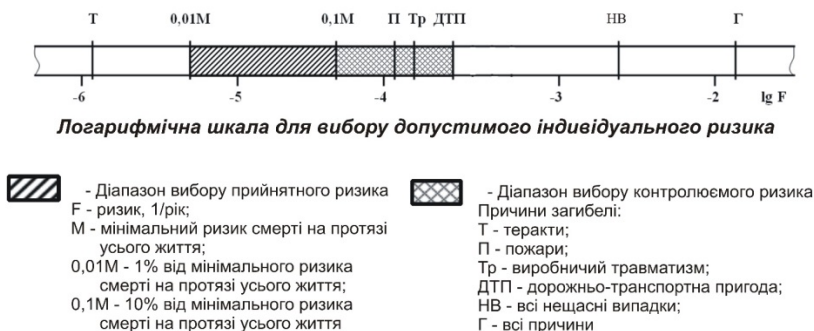


Рис. 1.14. Логарифмічна шкала рівнів ризику

R менше $5,0 \cdot 10^{-5}$ - область низьких ризиків, заходів щодо їх зниження не вимагається;

R від $5,0 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-3} - область, що вимагає вживання певних заходів щодо зниження ризиків з урахуванням економічної (фінансової) до-

цільності цих заходів. Найбільше значення цього інтервалу близьке до неприпустимого ризику;

R більше 10^{-3} - область високого ризику, яка вимагає обов'язкового виконання заходів щодо його зниження, не дивлячись на розмір фінансових витрат.

З урахуванням цих норм можуть бути встановлені критерії граничних значень для кожного рівня тяжкості наслідків відмови (рис. 1.15).

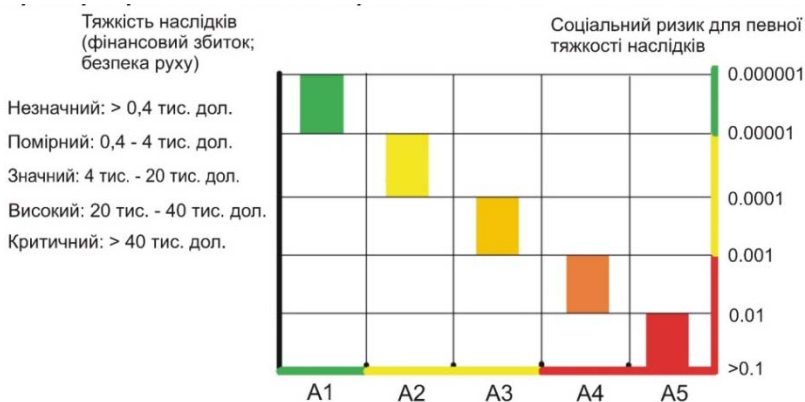


Рис. 1.15. Критерії граничних значень ризику для кожного рівня тяжкості наслідків відмови

Рівні тяжкості наслідків відмови встановлюються залежно від параметрів обладнання, робочого середовища й виду можливого руйнування по функціях приналежності на підставі експертних оцінок.

1.2.4. Процедура «оцінка ризику»

Крок 5. У системному аналізі під процедурою «оцінка» [24, 39, 44, 74] розуміють процедуру аналізу і вибору альтернатив шляхом порівняння різних ознак стану об'єкту з ознаками, що враховують його динаміку і ретроспективу.

Для встановлення рівня ризику відмови елементів обладнання ОМПН (R1...5) введемо матрицю аналізу, де рівні ризику визначаються за критеріями рівнів ймовірності ($P_1 \dots P_5$) і тяжкості наслідків ($A_1 \dots A_5$) відмови. Метрику ймовірності і метрику наслідків побудуємо з використанням категорій, представлених в табл. 1.6.

При встановленні прийняттого рівня ризику виходитимемо із загальноприйнятих гранично допустимих норм на соціальний ризик [53, 69], позначених на рис. 1.11.

Таблиця 1.6.

Матриця ризиків

		Важкість наслідків				
		5	4	3	2	1
Вірогідність подій	E	E5	E4	E3	E2	E1
	D	D5	D4	D3	D2	D1
	C	C5	C4	C3	C2	C1
	B	B5	B4	B3	B2	B1
Вероятність причинення вреда	A	A5	A4	A3	A2	A1

- R5 – високий ризик
- R4 – ризик вище середнього
- R3 – середній ризик
- R2 – низький ризик
- R1 – дуже низький ризик

Відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 31000:2009 («Risk Management - Principles and guidelines [73]), рівні ризику, встановлені на етапі аналізу ризиків, віднесемо до 3-х класів, відповідних наступним реперним термам (табл. 1.7):

- III – високий, експлуатаційні властивості ОМПН, напряду пов'язані з ними, потребують регламентації шляхом встановлення вимог до конструкції відповідних систем або вузлів ОМПН;
- II – середній, вимагається регламентація експлуатаційних режимів технічного обслуговування, але не конструкції;
- I – низький, регламентація експлуатаційних режимів і конструктивні зміни не вимагається.

Таблиця 1.7

Групи ризику

Групи ризику	Рівні ризику	Захисні міри
III	E5, E4, E3, D5, D4, D3, C5, C4, B5	Необхідні захисні міри для зниження ризику
II	E2, E1, D2, D1, C3, B4, B3, A5, A4, A3	Потрібний аналіз для визначення захисних мір для забезпечення прийняттого рівня ризику
I	C2, C1, B2, D1, A2, A1	Не потрібні захисні міри
Для жовтої групи ризиків необхідно враховувати співвідношення «затрати – вигода»		

Графічна ілюстрація розподілу вузлів та елементів обладнання по рівнях можливості настання небезпечної події (відмови) від прогнозованого значення залишкового ресурсу роботи до переходу обладнання в граничний стан з урахуванням рівня якості обстеження представлена на рис. 1.17.

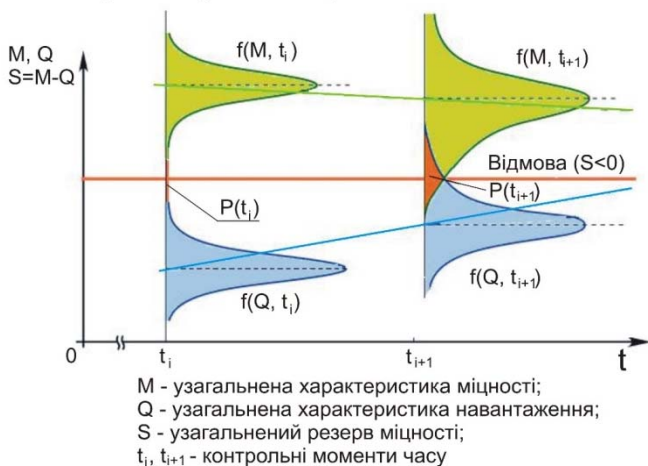


Рис. 1.16. Графічна ілюстрація ймовірнісно-статистичного підходу до оцінки ризику

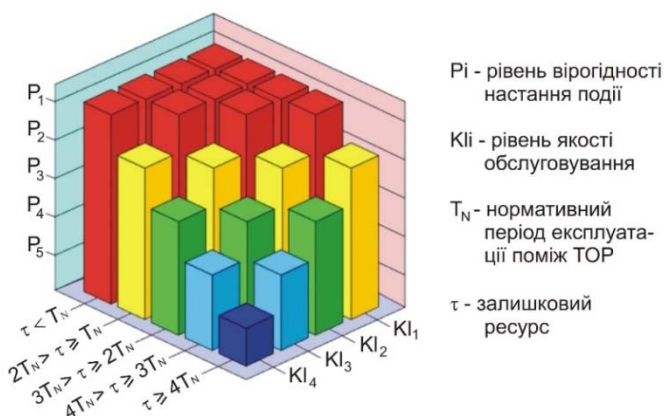


Рис. 1.17. Діаграма залежності рівнів ризику від остаточного ресурсу і якості обслуговування

Графік залежності значень $\lg P$ від τ представлено на рис. 1.18. Шляхом нанесення на представленому графіку залежності зон допустимих значень ймовірності відмови, відповідних різним рівням ризику і розподілу τ на ділянки, кратні нормативному часу (T_N) експлуатації між технічними обслуговуваннями обладнання ОМПН, одержано зони областей ризику відмови різнопошкоджених елементів для кожного з рівнів тяжкості наслідків можливої відмови.

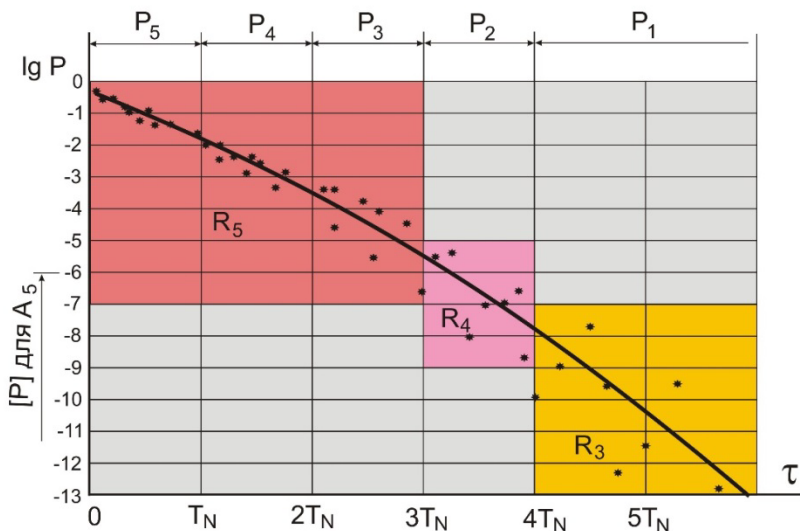


Рис. 1.18. Графік залежності значень $\lg P$ від τ і області ризику по важкості наслідків A_5

На рисунку 1.18 представлено такий графік для рівня тяжкості наслідків відмови по A_5 . Поєднанням подібних графіків залежностей для рівнів тяжкості наслідків по A_4, A_3, A_2, A_1 і зон рівнів ризику відмови R_4, R_3, R_2, R_1 побудовано представлений на рисунку 1.19 суміщений графік–матрицю напівкількісної оцінки ризику різнопошкоджених елементів обладнання ОМПН з використанням опорних рівнів ризику з урахуванням ймовірності і тяжкості наслідків відмови.

Стратегія ризику передбачає поетапну реалізацію на основі поступового впровадження та оснащення депо необхідним обладнанням, тобто здійснення пілотного проекту в одному депо, потім проводиться відпрацювання і апробація взаємодій і алгоритмів і приймається рішення щодо поширення стратегії на інші депо, враховуючи зауваження та рекомендації, які виникли в процесі відпрацювання пілотного проекту.

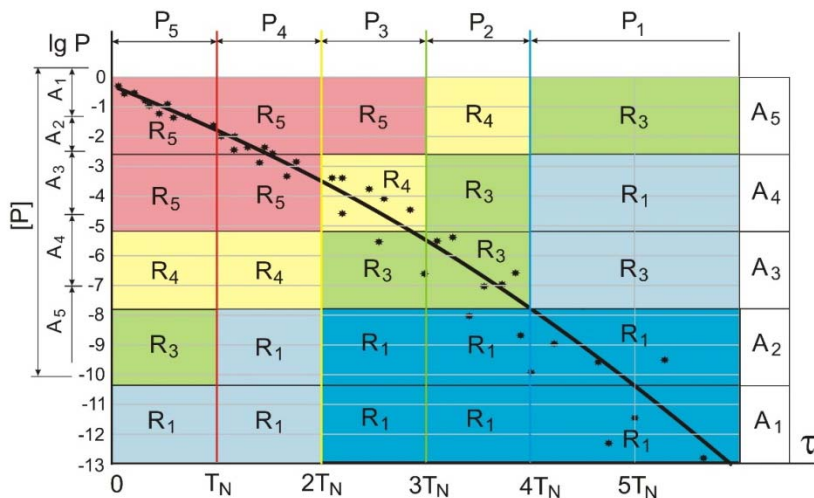


Рис. 1.19. Графік-матриця областей рівня ризику

Запровадження описаного підходу дозволяє суттєво знизити витрати на необґрунтовані перевірки та ремонти з одночасним збереженням потрібного рівня надійності.

1.2.5. Процедура «обробка ризику»

Крок 6. Обробка ризику. Сукупність заходів, направлених на зниження рівня ризику, зменшення потенційних втрат та інших негативних наслідків аварій складає, по суті, ситуацію обробки або управління ризиком [38, 58, 59].

Обробка ризику повинна бути циклічним процесом, включаючи:

- оцінку ризику;
- ухвалення рішення про допустимість залишкового ризику;

- при неприпустимості залишкового ризику, вироблення нової обробки ризику;

- оцінку результативності нової обробки.

При розробці заходів управління слід брати до уваги причини і наслідки для кожного ризику, а потім враховувати:

- можливості для виключення ризику або зниження до нульового рівня ймовірності виникнення ризику (виключення ризику);

- можливості для зміни наслідків ризику;

- можливості для зміни ймовірності виникнення ризику.

Слід сказати, що при існуючій системі планування ремонтів життєвий цикл вузлів ОМПН може закінчитися в міжремонтний період, тобто в процесі активної експлуатації, що у принципі неприпустимо, оскільки після закінчення життєвого циклу вузол повинен бути замінений і по ньому повинно бути ухвалено рішення - або після ремонту він допускається до подальшої експлуатації, або він списується.

Існуючий у ряді зарубіжних країн підхід до формування витрат на етапах життєвого циклу ОМПН має на увазі значне вкладення коштів саме при проведенні капітального ремонту з метою зниження їх в експлуатації [26, 30, 70, 77]. Вартість життєвого циклу ОМПН в Україні має зворотню тенденцію, при цьому значна частина коштів витрачається в експлуатації (рис.1.20).

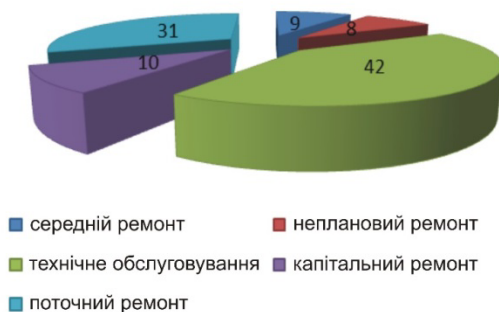
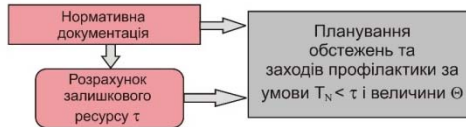


Рис. 1.20. Структура витрат в системі ППП

Концепція прийнятого ризику може обійтися помітно дешевше, але якщо обладнання, що експлуатується за такою стратегією, є джерелом великих збитків, витрати непомірно зростають.

В цьому випадку використання концепції ризику дозволить скорегувати ремонтний цикл, виходячи з критерію «зиск-ризик» на підставі оцінки можливості і тяжкості відмови.

Для елементів з R1 - R4 виконується розрахунок τ і Θ



Для елементів з R4 - R5 виконується розрахунок Θ і $W(u^*(t), \tau) = \min W(u(t), \tau)$

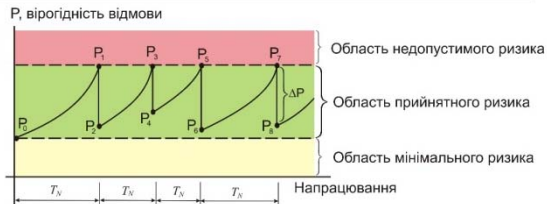


Рис. 1.21. Управління ризиком при обслуговуванні об'єктів експлуатації

IX	Наработка до наступного обстеження, ремонту, заміни	T
VIII	Критичний стан, мінімальний ризик втрат	$\min W(u(t), \tau)$
VII	Ранжування елементів за ризиком безпеки	R1, R2, R3 | R4 | R5
VI	Рівень ризику	Ri | Ri | Ri
V	Рівні вірогідності і важкості наслідків відмови	Pi | Ai | Pi | Ai | Pi | Ai
IV	Масштабний фактор ушкодження	θ | ... | θ | ... | θ | ... | ...
III	Параметри технічного стану (ПТС)	ПТС | ... | ПТС | ПТС | ... | ПТС | ... | ...
II	Граничний стан (ГС)	ГС | ... | ГС | ГС | ... | ГС | ... | ...
I	Вихідні дані	Конструктивні елементи та вузли Одиниця обладнання
Етапи	Предмет аналізу	Результати аналізу

Рис. 1.22. Модель оцінки ризику

«Співіснування» двох стратегій на перехідному етапі полягає у наступному. Планування обстежень (рис. 1.21) і заходів відновлення ресурсу для елементів обладнання, віднесених до рівнів ризику $R_1 - R_4$, здійснюється за наслідками нормативних розрахунків залишкового ресурсу їх роботи, а також з урахуванням випереджаючого контролю ризику. Планування обслуговування обладнання з рівнем ризику R_5 , а за наслідками оцінки ризику і з рівнем ризику R_4 , здійснюється окрім цього за наслідками випереджуючого контролю за критерієм мінімуму ризику.

Модель оцінки ризику і планування технічного обслуговування елементів обладнання за критеріями ризику й імовірності відмови представлена на рис. 1.22.

Схему замкнутого циклу руху інформаційного потоку бази даних в процесі експлуатації ОМПН представлено на рис. 1.23.

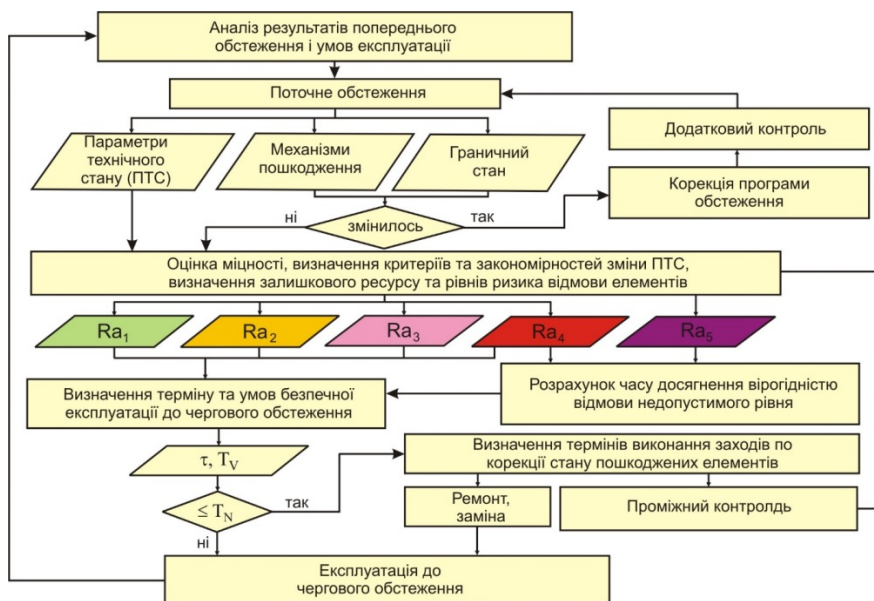


Рис. 1.23. Замкнутий цикл інформаційного потоку бази даних

При цьому контрольовані параметри виступають у якості параметрів, що формують єдиний інформаційний блок, який визначається як «інформація динамічних відмінностей», що будується на основі експе-

риментально вимірюваних характеристик і через це складають основу емпіричного знання про об'єкт експлуатації, що повною мірою відповідає моделі проблемної ситуації.

Результати аналізу, що наведені в наступному розділі, показують можливість отримання економії при прогнозуючому контролі обладнання.

1.3. Принципи і процедури наповнення інформацією структурних компонентів інформаційного відображення об'єкту експлуатації

На сьогоднішній день на у промисловості немає єдиних вимог, орієнтованих на впровадження концепції управління ризиком. Номенклатура засобів діагностики щорічно збільшується, об'єм інформації наростає. Цілеспрямований і централізований збір, обробка, аналіз і зберігання цієї інформації не здійснюється. Наявність великого числа розроблених АРМ та інформаційно-управляючих систем, орієнтованих по областях діяльності залізниці, з одного боку, забезпечує базис для практичного використання стратегії ризику, а з другого боку – створює дуже складну проблему ув'язки цих систем.

Тому виникає задача створення інтегруючого середовища - комплексної системи наукового моніторингу ризику, що дозволить перейти від аналізу конкретних, окремо взятих, загроз та небезпек до більш широкого системного міждисциплінарного погляду на небезпеки й пов'язані з ними ризики, перевести процес управління ризиками з оперативного рівня на тактичний і далі на стратегічний рівень. Зрештою, вона повинна розширити можливості прогнозувати й передбачати надзвичайні ситуації і своєчасно відпрацьовувати заходи щодо їх попередження.

Першим етапом є обґрунтування принципів створення комплексної системи наукового моніторингу ризику ОМПН. Обґрунтуванню цих принципів присвячено пункт 1.3.1.

Ці принципи укладаються в схему формування інформаційного відображення об'єкта експлуатації для безперервного наповнення і розвитку якої необхідний набір інструментів інформаційного простору, який концентрується у єдиному інформаційному ресурсі – експериментальному стенді системи наукового моніторингу ризику. Опис суті стенду, його архітектури та інформаційних потоків в ньому представлено в пункті 1.3.2.

Другий етап полягає у тому, що необхідно реалізувати заходи, які дозволять здійснити сформульовану на початку розділу *третю необхідну умову керованості ризику* – організацію робіт на принципах управління якістю. Реалізація цієї умови неможлива без вдосконалення структури управління ремонтним процесом, інтегрованої в рамках міжнародного стандарту ISO 9000, що має на меті функціонування об'єктів експлуатації в умовах глобального управління якістю. Розробці принципової схеми ієрархічних рівнів системи управління якістю в рамках стратегії управління ризиком у середовищі стандарту ISO 9000 присвячено пункт 1.3.3.

1.3.1. Принципи створення системи наукового моніторингу ризику ОМПН.

Виділемо наступні найважливіші принципи [55], якими слід керуватися при створенні системи моніторингу ризику (рис. 1.24).

Принцип еволюціонізму. У досліджуваних, спостережуваних і прогнозованих системах слід виходити з аналізу системної тріади: «спадкоємність – змінність – відбір» [96]. Зокрема, однією з основних задач комплексної системи є прогноз незбуреного розвитку об'єкту на підставі аналізу його нинішнього стану і виявлених трендів, «успадкованих» від попередніх станів (передісторії). Результатом аналізу «змінності» виявляється множина сценаріїв розвитку подій. І найважливішою задачею комплексної системи є їх «відбір» і редагування на основі об'єктивних законів - в одних випадках, в інших – на основі моделювання, в третіх – на основі статистики, в четвертих – на основі експертного знання.

Принцип науковості. Особливістю системи моніторингу, що розробляється, є внесення в практику прогнозування методів, ідей і підходів, що існують і розвиваються у фундаментальних науках.

Принцип спадкоємності і розвитку. Система моніторингу ризику в цілому повинна бути інструментом для системної інтеграції і розвитку вже наявного потенціалу, тому всі моделі, знання, алгоритми і дані незалежно від їх походження можуть і повинні бути застосовані в системі [54].

Принцип системної цілісності. Мета системи – одержати ясне цілісне бачення небезпечних процесів, моделей, алгоритмів і теорій, що дозволяють вирішувати задачі прогнозування і моніторингу ризику. При цьому необхідною умовою для такого знання є його міждисциплінарність, можливість бачити досліджувану суть в різних зрізах (очима різних фахівців), з різних точок зору [68].

Синергетичний принцип. При аналізі складних об'єктів принциповим є виділення змінних, що характеризують поведінку об'єкту і визначають динаміку решти змінних [40].

Нейросетевий принцип. Ціле в складних системах у багатьох випадках виявляється ефективнішим й успішнішим за будь-яку із частин, оскільки принципову роль виконують зв'язки між елементами системи, які настроюються на основі попереднього досвіду і вирішуваних в даний час задач. Тому принципова роль інформаційних потоків, схем взаємодії експертів, механізмів адаптації цієї системи в крупніші і складніші системи [60].

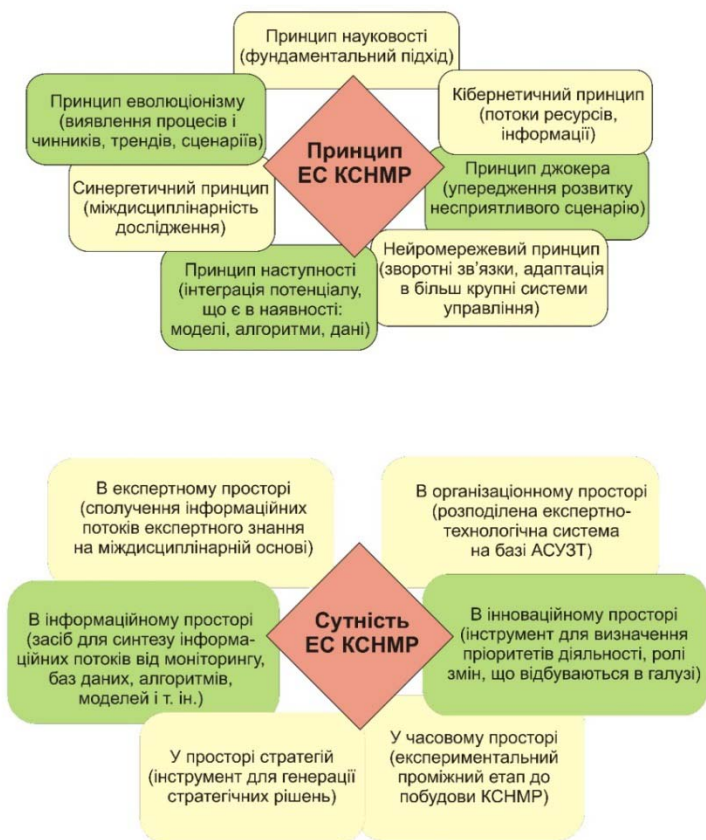


Рис. 1.24. Принципи і сутність КСМР

Кібернетичний принцип. Система повинна бути структурою, яка підтримується завдяки потокам ресурсів, інформації і здійснює випереджаюче віддзеркалення, що дозволяє передбачати проблеми і вибирати найточніші способи зміни ситуації [112].

Принцип джокера. Для складних систем характерна наявність станів, стратегій і дій, які швидко і радикально міняють ситуацію. Область в просторі станів системи, де таке можливе, одержали назву джокерів [62]. Однією з ключових задач є створення алгоритмів, орієнтованих на виявлення областей джокерів, на аналіз і моніторинг преддефектного стану, на дослідження можливих ситуацій і корегуванні стратегії, що дозволяє парировати ці ситуації.

Принцип двостороннього зв'язку - один з найважливіших принципів управління. Згідно цьому принципу успішне управління можливе лише в тому випадку, якщо суб'єкт управління одержує інформацію про ефект, досягнутий тією або іншою дією об'єкту управління, а також про його стан і про досягнення або недосягнення поставленої мети [68].

Ці принципи укладаються в схему формування інформаційного відображення об'єкту експлуатації, яку було розглянуто вище, для наповнення якого пропонується дослідницький стенд [55] системи моніторингу ризику ОМПН.

1.3.2. Експериментальний стенд системи наукового моніторингу ризику

Як відомо, на даний час державні узгоджені показники та керівні документи щодо визначенням ризиків в техносфері, або не розроблено, або тільки знаходяться у стадії розробки.

Оскільки, як було відмічено, така задача є багатокритеральною і вимагає проведення численних досліджень, для її вирішення необхідне безпервне поповнення і розвиток інформаційного відображення об'єкту експлуатації в процесі моніторингу.

Рішення цієї задачі бачиться у застосуванні якогось інструментального засобу для вироблення обгрунтованого рішення при стохастично виникаючих ситуаціях, що дозволить здійснити системну інтеграцію робіт, що ведуться у області управління ризиком і розробку заходів по попередженню небезпечних ситуацій, пов'язаних з раптовими відмовами і аваріями.

Передбачається, що цей інструмент здійснюватиме наукову підтримку системи управління якістю, як того вимагають міжнародні норми згідно ІСО 9000 [81, 83, 84]. Інтеграція процесів в рамках такого засобу

дозволить перейти від аналізу конкретних окремих випадків непередбачених аварійних ситуацій і раптових відмов до ширшого системного, міждисциплінарного погляду на проблему і, зрештою, розширити можливості прогнозувати небезпечні ситуації і своєчасно відпрацьовувати заходи по їх недопущенню, виробити інструкції, нормативні документи, які дадуть можливість кількісно визначати критерії, на основі яких може бути оцінений ризик.

Для вирішення задачі оцінки ризику і визначення прийнятного рівня ризику при управлінні безпекою ОМПН, а також вироблення заходів по попередженню небезпечних ситуацій пропонується структурна модель стенду, яка в методичному плані наочно демонструє принцип об'єднання теоретичних розробок і практичного досвіду в області управління ризиком.

Механізм роботи стенду [55] базується на блочній структурі у вигляді системних процедур.

Перший блок – інформаційно-аналітичний. Забезпечує збір, первинну обробку і аналіз інформації, її зберігання і представляє відповідним чином організований комп'ютерний банк даних і бібліотеку документів, що містять необхідні для управління ризиком первинні відомості.

Другий блок – досліджень. Він забезпечує безперервну підтримку процесу управління ризиком за допомогою розробки необхідних методик, норм і правил, відповідних особливостям конструкцій ОМПН.

Третій блок – аналітичної експертизи і прогнозних досліджень. Використовуючи продукт попереднього блоку і методи проведення експертизи, виконується «ризиковий моніторинг», здійснюється прогноз ризику і наслідків, оцінюється збиток, формалізуються переваги, виробляються рекомендації щодо стратегії і тактиці дій.

Четвертий блок – безпосередньо управління.

Таким чином, можна говорити про певну технологію ухвалення управлінських рішень, як про суму процедур аналізу і оцінки ситуацій, пов'язаних зі зміною технічного стану ОМПН, вироблення варіантів рішень, організації і контролю їх виконання.

1.3.3. Система контролю і управління якістю як засіб підвищення безпеки ОМПН

Інформаційна система управління ремонтом ОМПН має складну структуру з численними зв'язками і великими об'ємами інформаційних потоків, що часто призводить до виникнення розузгоджень і помилок, що в умовах концепції управління ризиками неприпустимо.

Потрібна єдина система управління ризиком як виробничою діяльністю в рамках формування єдиного середовища глобального управління якістю, як того вимагає міжнародний стандарт ISO 9000 («Система якості: модель забезпечення якості при виробництві, монтажі і обслуговуванні»), який є сучасним рівнем управління якістю функціонування об'єктів експлуатації і включає перелік апробованих елементів, необхідних для забезпечення безпеки [5, 21].

Необхідність створення в рамках концепції управління ризиками повноцінної системи управління якістю (Quality Management System) визначається також вимогами ринку. Для українських підприємств сертифікація по ISO 9000 – це ще і пропуск на міжнародний ринок, а також дієвий засіб для ефективної організації забезпечення безпеки.

Звідси виникає задача створення для експлуатаційного підприємства єдиного інформаційного простору, відповідного міжнародному стандарту якості ISO 9000, в рамках якого представляється можливим процесу управління ризиком віднести до рівня систем управління основними фондами підприємства (рис. 1.25).

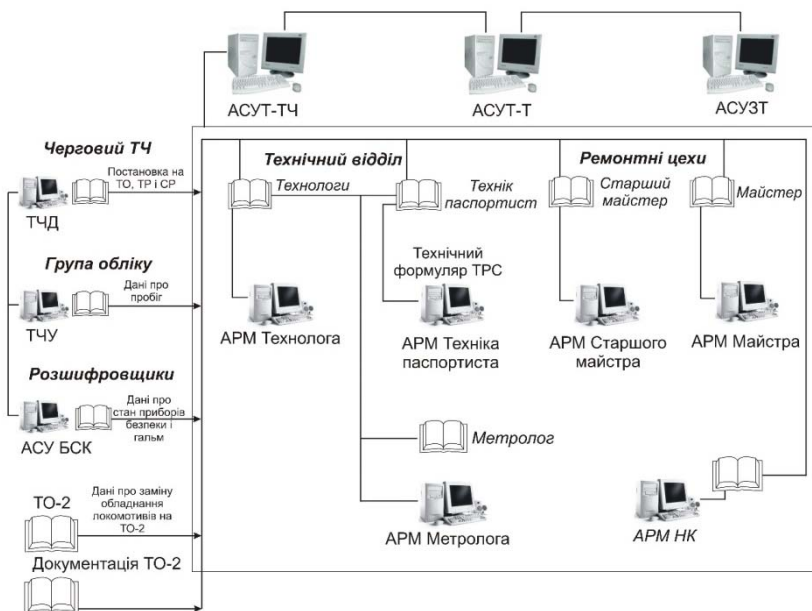


Рис. 1.25. Інформаційні потоки при ремонті ОМПН

Ядро системи складають бази даних, що містять інформацію про стан обладнання, час роботи об'єкту між профілактиками, відпрацьованому часі, зносі обладнання та ін., звідки призначаються управляючі заходи, обчислюються терміни наступного обслуговування.

На основі моніторингу баз даних плануються профілактичні і ремонтні роботи, формуються наряди на відповідні роботи за планом або по фактичному стану, реалізується процедури аналізу і оцінки ризику, прогноуються витрати і потреби в матеріально-технічному постачанні. Реалізація цих функцій здійснюється за допомогою інтеграції з системами вищого рівня управління основними фондами (ERP – Enterprise Resource Planning) [72].

У міру наповнення бази даних і бази знань, яка формується при рішенні задач в рамках дослідницького стенду, створюються передумови для стратегічного планування і вирішення задач вищого рівня: планувати роботи, виходячи з накопиченої статистики зносу і відмов обладнання, аварійних ситуацій, забезпечуючи випереджаючий механізм управління безпекою ОМПН.

Висновки до розділу 1

1. Розроблено методологію управління ризиком, яка створює основу для прийняття рішення по забезпеченню безпеки при проектуванні, виготовленні й експлуатації ОМПН, розробки технології їх технічного обслуговування, норм і стандартів, пов'язаних із забезпеченням безпеки ОМПН, що дозволяє отримувати обґрунтовану кількісну порівняльну оцінку ризику і, відповідно, раціонально розподіляти ресурси, що виділяються при плануванні та забезпеченні безпеки на виробництві.

Забезпечення довготривалої ресурсозберігаючої безпечної експлуатації ОМПН, засноване на застосуванні методів аналізу і оцінки ризику, може одержати реалізацію з безумовним дотриманням всіх аспектів, які властиві управлінню ризиком, які сформульовано наступним чином:

- рішення з питань безпеки завжди містять припущення про готовність нести витрати. При цьому можливий великий розкид значень, що указує на непостійність оцінок;

- в основі стратегії управління ризиком лежать критерії, засновані на завданні прийнятних рівнів ризику, тобто слід контролювати втрати, які обумовлені схильністю системи до великомасштабної події, а не прагнути до того, аби параметри надійності приймали свої якнайкращі значення;

- придатного для всіх випадків значення граничних витрат не існує. Граничні витрати включають різні елементи, які, зрештою, визначають готовність нести ці витрати. Перший елемент – це безпосередній збиток, який виникає при аварії; другий елемент – це економічні наслідки аварії, які оцінюють залежно від заподіяного збитку; третій елемент охоплює додаткову готовність мінімізувати збиток вживанням заходів безпеки.

2. Запропоновано теоретичний підхід до оцінки безпеки ОМПН, в основу якого покладено матрицю комплексної безпеки ОМПН і показник комплексної безпеки ОМПН, який визначається на основі експертних оцінок впливу конструкції на ризики спричинення шкоди і пов'язану з ним базу даних нормованих рівнів ризику, які визначаються шляхом причинно-наслідкового аналізу ризику, що дозволяє:

- встановити закономірності впливу конструктивних особливостей ОМПН на ризики заподіяння шкоди;

- проводити кількісну оцінку рівня безпеки ОМПН.

3. Розроблено принципи формування системоорганізуючого середовища для інтеграції робіт з науково-технічного супроводу та відпрацювання заходів з управління ризиками на виробництві, що дозволяє запропонувати організаційно-інформаційну структуру розподіленої експертно-технологічної системи, орієнтованої на цілі моніторингу ризику, та дозволяє забезпечити інформаційну, наукову та експертну підтримку організаційних, технологічних і технічних заходів для вирішення одного питання - управління ресурсом безпечної експлуатації ОМПН - і поданням їх в інноваційному, технологічному та правовому просторі.

Новизна даного підходу полягає в систематизації різних організаційних, технологічних і технічних заходів для вирішення одного питання - підвищення безпеки ОМПН і представлення їх в інноваційному, технологічному та правовому просторі.

4. Запропоновано принципову інформаційну схему системи управління ресурсом безпечною експлуатацією ОМПН, інтегровану в єдину систему управління основними фондами підприємства згідно стандарту ISO 9000, що дозволяє забезпечити єдиний інформаційно-логічний процес побудови і модернізації системи управління безпечною ресурсозберігаючою експлуатацією ОМПН, а також диференційовані функції, що входять до зони відповідальності стандарту.

Перелік посилань до розділу 1

1. Аверкин А.Н. Нечеткие множества в задачах управления и искусственного интеллекта / [Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф. и др.]; под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986.
2. Акаев А.А. Проекты и риски будущего: Концепции, модели, инструменты, прогнозы / Акаев А.А., Коротаев А.В., Малинецкий Г.Г., Малков С.Ю. - М.: URSS, 2011. - 432 с.
3. Акимов В.А. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски / Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. — М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001.
4. Александров Г. Устойчивость, безопасность, риск / Г. Александров, Шахманский // Военные знания, 1993. - № 11 - 12. - С. 8-11.
5. Амбарцумян Л.Л. САПС – система предупреждения аварийных ситуаций с потенциально опасной технологией (методологические основы) / Амбарцумян Л.Л., Воронин Б.Н. // Труды конференции по САПР. – М.: Ин-т пробл. упр., 2005.
6. Афанасьева Л.А. Система анализа и классификации человеческого фактора – HFACS / Л. Афанасьева. // Проблемы безопасности полетов. – М.: ВИНТИ, 2001. - №12. - С. 15-33.
7. Базаров И. П., Геворкян Э. В., Николаев П. Н. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика / Базаров И. П., Геворкян Э. В., Николаев П. Н. - М.: МГУ. - 1989.
8. Баранов В. В. Методы равновесий в задачах стохастического управления и динамического принятия решений при неопределенностях / В. Баранов // Сб.: Нелинейная теория управления и ее приложения: динамика, управление, оптимизация. - М.: Наука, 2003. - С. 247-312.
9. Баранов В. В. Модели и методы принятия управляющих решений в интересо-ориентированных системах по критериям полезности и риска с учетом техногенной безопасности / В. Баранов // Тр. междунар. Научн. школы «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах». - СПб., 2004. - С. 416-423.
10. Баранов В. В. О проблеме и методах корпоративного выбора / В.Баранов // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2006. - № 2.
11. Баранов В. В. Процессы принятия решений, мотивированных интересами / В.Баранов. — М.: Наука, 2005. - 296 с.
12. Барзилович Е.Ю. К проблеме обслуживания сложных технических систем / Барзилович Е.Ю. // Известия АН СССР: Техническая кибернетика, 1966. - №6.
13. Барзилович Е.Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию / Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. - М.: Транспорт, 1981. – 197 с.
14. Барлоу Р. Математическая теория надежности / Барлоу Р., Прошан Ф. - М.: Сов. радио, 1969. - 488 с.
15. Безопасность. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных,

- технических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций / Под ред. К. В. Фролова. — М.: МГФ "Знание", 1998.
16. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техно-сфере / Белов П.Г. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 512 с.
 17. Берже П. Порядок в хаосе / Берже П., Помо И., Видаль К. - М.: Мир, 1991.
 18. Блинов Э.К. Техническое обслуживание и ремонт судов по состоянию / Блинов Э.К., Розенберг Г.Ш. - СПб.: Судостроение, 1992. — 183 с.
 19. Босечаева З. Н. Управление экономическим ростом / З. Босечаева. — М.: Экономика, 2004.
 20. Буїв В. В. Рекомендації по розробці технічних регламентів / Буїв В. В., Белов А. З., Грот В.В. — М.:НИСИПП, 2005.
 21. Быков А.А. Нормативно-экономические модели управления риском / Быков А.А., Акимов В.А. // Проблемы анализа риска, 2004. — Т. 1. - [Издание Российского научного общества анализа риска].
 22. Быков А.А. Проблемы анализа безопасности человека, общества и природы / Быков А.А., Мурзин Н.В. — СПб: Наука, 1997.
 23. Владимиров В.А. Оценка риска и управление техногенной безопасностью / Владимиров В.А., Измалков В.И., Измалков А.В. — М.: Деловой экспресс, 2002.
 24. Владимиров В. А. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика / Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. и др. — М.: Наука, 2000. - 431 с.
 25. Военный стандарт США - 882С-1987. (US MIL STD-882С:1987). Программные требования к безопасности системы. Министерство обороны США (System Safety Program Requirements. Department of Defense).
 26. Головатый А.Г. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов за рубежом / А. Головатый, Ю. Лебедев. - М.: Транспорт, 1977. - 158 с.
 27. Голодовников А. Н. Определение оптимальной предупредительной замены на основе информации о математическом ожидании и дисперсии безотказной работы / Голодовников А. Н., Стойкова Л. С. // Кибернетика, 1973. - № 3. - С. 110-118.
 28. Горшков В.Г. Устойчивость биосферы и сохранение цивилизации / Горшков В.Г., Кондратьев К.Я., Шерман С.Г. // Природа, 1993. — № 3.
 29. ГОСТ Р 51901-2002 «Аналіз ризику технологічних систем», 2003.
 30. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования. Учебное пособие для вузов гражданской авиации / [В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, Ю.В. Козлов и др.]; Под ред. И.М. Синдеева. - М.:Транспорт, 1984. -191 с.
 31. Донелла Х. Медоуз. Пределы роста / Донелла Х. Медоуз, Деннис Л. Медоуз и др. // Доклад по проекту Римского клуба «Сложное положение человечества». — М.: МГУ, 1991.
 32. Елагин Ю.П. Понятие «Безопасность» / Елагин Ю.П. // Атомная энергия, 1996. - Т.80. - Вып. 6. - С. 415-420.
 33. Еремин А.Д. Управление техногенными рисками / Еремин А.Д., Печенин Н.К. // Развитие систем экологического менеджмента в России: Сб научн. тр. РАН. — М.: 2001. - С.73-75.

34. Заславский Г. М. Стохастичность динамических систем / Г. Заславский. - М.: Наука, 1984. - С. 270.
35. Исикава К. Японские методы управления качеством / Исикава К.; сокр. пер. с англ. [под. Ред. А.В. Гличева]. - М: Экономика, 1988. – 214 с.
36. ИСО/ТО 12100-1-92 (ISO/TR 12100-1:1992). Безопасность машин. Основные концепции, общие принципы конструирования. Часть 1. Основная терминология и методология (Safety of machinery - Basic concepts and general principles for design - Part 1: Basic terminology and methodology).
37. ИСО/ТО 12100-2-92 (ISO/TR 12100-2:1992). Безопасность машин. Основные концепции, общие принципы конструирования. Часть 2. Технические принципы (Safety of machinery - Basic concepts and general principles for design - Part 2: Technical principles).
38. ИСО 14121-99. (ISO 14121:1999). Безопасность машин. Принципы оценки рисков (Safety of machinery - Principles of risk assessment).
39. Капица С.П. Синергетика и прогноз будущего / Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. — М.: Едиториал УРСС, 2003.
40. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем / Климонтович Ю. Л. - М.: Янус, 1995.
41. Князева Е. Н. Сложные системы и нелинейная динамика в природе и обществе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.synergetic.ru/society/index.php?article=kn3>.
42. Козак Н. Бенчмаркинг как инструмент повышения конкурентоспособности компании / Н.Козак //Управление компаний, 2000. - № 1-2. - С. 15-20.
43. Колесников А. А. Основы теории синергетического управления / А.Колесников - М.: Испо-Сервис, 2000.
44. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза / Колесников А.А. — М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
45. Костерев В.В. Агрегирование вероятностной и нечеткой информации в задачах оценки риска / Костерев В.В. // Инженерная физика, 2000. - №4. - С.8-12.
46. Костерев В.В. Метод экспертной оценки риска с использованием лингвистических переменных / Костерев В.В., Лапшина В.А. // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2003. - Санкт - Петербург, 25 - 27 июня. 2003. - С. 112-115.
47. Костерев В.В. Методы приближенных рассуждений в интеллектуальных системах оценки риска / Костерев В.В., Аверкин А.Н., Болятко В.В. // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. - Санкт-Петербург, 2001. - С. 180-185.
48. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
49. Кочкаров А.А. Управление безопасностью и стойкостью в условиях внешних воздействий / Кочкаров А.А., Малинецкий Г.Г. // Проблемы управления, 2005. - № 5. – С. 70-76.
50. Красовский А. А. От кибернетики, синергетики к принципу наименьшего действия управляемых самоорганизующихся систем / А.Красовский // Со-

- временные методы управления динамическими системами, 2003. - Вып. 1. - С. 5-34.
51. Кузьмин И.И. Принципы управления риском / Кузьмин И.И. // «Проблемы анализа риска», 2005. - Т. 2. - № 1. - С. 73-93.
 52. Легасова М. М. Путь к концепции безопасности / М. Легасова // Журн. Всесоюз. хим. общества им. Д. И. Менделеева, 1990. - Т. 35. - № 4. - С. 405-408.
 53. Малинецкий Г.Г. Наука о риске и жизни / Малинецкий Г.Г. // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. - М.: 2001. - Вып. 3. - С. 59-71.
 54. Малинецкий Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. - М.: Едиториал УРСС, 2002.
 55. Математика: Энциклопедия / Под ред. Ю.В. Прохорова. - М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. - С. 35.
 56. Махутов Н.А. Проблемы снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера / Н. Махутов // «Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях». – М., 2001. - Вып. 3. - С. 29-41.
 57. Методика оценки возможного экономического и экологического ущерба от реализации внутренних и внешних угроз на АЭС концерна "Росэнергоатом". - М.: 2004.
 58. Міжнародний стандарт ІЕС 60300-3-9:1995 «Аналіз ступеня ризику технологічних систем».
 59. Міжнародний стандарт ISO 14121:1999 «Безпека устаткування - принципи оцінки ризику».
 60. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н. Моисеев. - М.: Наука, Гл. ред. Физ.-мат. Литературы, 1981. - 488 с.
 61. Неймарк Ю. И. Динамические системы и управляемые процессы / Ю. Неймарк. - М.: Наука, 1978.
 62. Нестационарные структуры и диффузионный хаос / Т. С. Ахромеева, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий, А. А. Самарский. — М.: Наука, 1992.
 63. Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие / Под ред. Г. Г. Малинецкого, С. П. Курдюмова. // Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения. - М: Наука, 2002. - 480 с.
 64. Петухов Р.М. Методика экономической оценки износа и сроков службы машин / Р. Петухов - М.: Экономика, 1965. - 167 с.
 65. Подлазов А.В. О национальной системе научного мониторинга / Подлазов А.В., Кузнецов И.В., Малинецкий Г.Г. // Вестник РАН, 2005. - Т. 75. - № 7. - С. 1-16.
 66. Потапов Б.В. Оптимизация защиты территории от природных и техногенных опасностей / Б. Потапов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2001. – Вып. 6. - С.13-22.
 67. Практическая реализация методологии ALARA на АЭС: Методическое пособие. - М., 2010.
 68. Прангишвили И. В. Разрешение проблемных ситуаций в период современной трансформации / Прангишвили И. В., Максимов В. И. // Общество и экономика, 2001. - № 11 - 12.

69. Прангишвили И.В. Системные закономерности и системная оптимизация / Прангишвили И.В., Бурков В.Н. и др. - М.: СИНТЕГ, 2004. - 208 с.
70. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / Прангишвили И.В. - М.: СИНТЕГ, 2000. - 528 с.
71. Прангишвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности, вопросы управления сложными системами / И.Прангишвили. - М.: Наука, 2003. - 428 с.
72. Пригожин И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени / Пригожин И., Стенгерс И.; пер. с англ. - М.: Едиториал УРСС, 2003. . - 240 с.
73. Пути улучшения использования локомотивов (США) // Железные дороги мира, 1996. - № 5. - С. 33-35.
74. Рац В.М. Концепция обеспечения безопасности / Рац В.М., Слепцов Б.Г., Копылов Г.Г. - М.: «Касталь», 1995.
75. Режимы с обострением: эволюция идеи / Под ред Г.Г. Малинецкого. - М.: Физматлит, 2006. – 312 с.
76. Романовский Ю.М. Математическая биофизика / Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 304 с.
77. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / Рябинин И.А. – СПб.: Политехника, 2000.
78. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов / Савчук В.П. - М.: Наука, 1989.
79. Синергетика и проблемы теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. - М.: Наука, 2004.
80. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта на базе интеллектуальных технологий. – М.: ВНИИЖТ, 2002. - 30 с.
81. Состояние уровня автоматизации энергетических объектов и системотехнические решения, направленные на его повышение / И. В. Прангишвили, А. А. Амбарцумян, А. Г. Полетыкин и др. // Проблемы управления, 2003. - № 2. - С. 11-26.
82. Стандарти Міжнародної організації зі стандартизації - ISO : Довідник: в 3 т. / В.Л. Иванов (ред.), В.А. Павлюкова (уклад.). – Л.: Леонорм, 1998. – 259с. – (Нормативна база підприємства). – Т. 1. – 259 с.
83. Стратегические риски. Оценка и прогноз. / Под ред. Ю.Л. Воробьева. - М.: Деловой экспресс, 2005.
84. Текст СТБ 1506 - 2004 Управление качеством. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов.
85. Тененев В.А. Оптимальное управление детерминированными и нечеткими системами/ В.А. Тененев, Б.А. Якимович, Н.Б. Паклин // Вестник ИжГТУ. – Ижевск:ИжГТУ, 2003. – Вып. 1. – С. 35-40.
86. TQM XXI. Проблемы, опыт, перспективы. Выпуск 1. Академия проблем качества России.: АО “ТБК Интерсифика”, 1997. – 176 с.
87. Управління якістю продукції / О.Й.Запунний, О.Д.Запунний, І.В.Полуда, С.М.Савченко, В.Д.Немцов. – К.: Київський політехнічний інститут, 1998. – 134с.
88. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

89. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений / П.Фишберн. - М.: Наука, 1978.
90. Фомичев С.К. Основы управления качеством: Учебное пособие / Фомичев С.К., Старостина А.А., Скрыбина Н.И. // Межрегиональная академия управления персоналом. – К.: МАУП, 2000. – 194 с.
91. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Хакен Г. - М.: Мир, 1985.
92. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах / Хан Г., Шапиро С. [пер. с англ. Е. Г. Коваленко]; под ред. В. В. Налимова. - М.: Мир, 1969. - 396 с.
93. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж.Хенли, Х. Кумамото. - М.: Машиностроение, 1984.
94. Черкасов В.В. Проблемы риска в управленческой деятельности / В.Черкасов. — М.: «Рефлбук», Киев: «Ваклер», 2002.
95. Чернова Г.В. Управление рисками / Чернова Г.В., Кудрявцева А.А. - М: ТК Велби Проспект, 2003.
96. Шаповалов В. П. Законы синергетики и глобальные тенденции / Шаповалов В. П., Казаков Н. В. // Общественные науки и современность, 2002. - № 3. - С. 141-148.
97. Шаповалов В. И. Модель устойчивости экономической системы смешанного типа / В.Шаповалов // Синергетика и проблемы теории управления. - М., 2004. - С. 447-453.
98. Шелихов А.М. Концептуальные основы стратегии устойчивого развития / Шелихов А.М. – М.: Зеленый мир. 2002. - № 15–16.
99. Ansell J. Risk, Analysis, Assessment and Management / J.Ansell, F.Wharton - Wiley, 1992.
100. Ayyub B. M. Risk Analysis in Engineering and Economics / B. M. Ayyub. - Chapman & Hall/CRC, 2003.
101. Beck U. From Industrial Culture to the Risk Society. Theory, Culture and Society, 1992. - Vol. 9, - No. 1. - С. 97-123.
102. Cahrssen J. J. Risk Analysis: A Guide to Principles and Methods for Analyszing Health and Ennvironmental Risks / J. J. Cahrssen, V.T. Covello, 1989.
103. Covello V.T. Risk Assessment Methods. Approaches for Assessing Health and Environmental Risks / Covello V.T., Merkhofer M.W. // Plenum Press, New York and London, 1993.
104. Kosterev V.V. Aggregation of probabilistic and fuzzy information in risk assessment / Kosterev V.V., Averkin A.N. // Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements. - St. Petersburg, May 25 - 28, 1999. - P.196 - 199.
105. Tversky A. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases / A. Tversky, D.Kahneman, 1974.
106. Zadeh L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process / Zadeh, L.A. // IEEE Trans. Sys. Man. Cyb., SMC-3, 1977 - No. 1.

ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС МОДЕЛЕЙ ПРИЗНАЧЕННЯ СТРАТЕГІЙ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОМПН В МЕЖАХ ВИМОГ КОНЦЕПЦІЇ УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ

2.1. Процедури й елементи системного аналізу процесів управління безпекою ОМПН

Управління безпекою ОМПН, що засноване на застосуванні методів аналізу і оцінки ризику, може отримати реалізацію із безумовним дотриманням всіх ознак і принципів, які властиві управлінню в сучасному його розумінні [8, 16, 26, 30, 61]. Нові підходи до управління у сфері безпеки повною мірою узгоджуються із ризик-методологією і розвивають її основні положення [10, 23, 30, 65].

Діюча на підприємствах України система планово-попереджувальних ремонтів (ППР) заснована на наперед регламентованій періодичності ремонтів зі встановленими можливими межами її зміни для різних видів обладнання [39, 72, 76, 58,]. В останній час ця стратегія піддається численній критиці як у нас в країні так і за кордоном [3, 4, 5, 10, 6, 13, 16, 13, 24, 16, 19, 31, 37, 44, 48, 49, 50, 46, 75, 79, 55, 62, 63, 64, 71, 72, 110, 75].

На основі аналізу існуючих методик забезпечення технічної експлуатації ОМПН можна з упевненістю назвати блоки задач, які повинні розглядатися при виробленні стратегії технічної експлуатації з позиції управління ризиками, а саме: постійно діючий аналіз працездатності вузлів металоконструкцій з метою забезпечення віддзеркалення динамічного різноманіття їх технічного стану у методах управління джерелами аварійних ситуацій, що висуває задачу відображення проблеми в інформаційному аспекті з урахуванням концепції ризику. Відповідно до цього в пункті 2.1.1 приведено формалізований опис задачі призначення стратегій ТОіР в межах вимог цілей управління технічною експлуатацією ОМПН за станом з використанням понять кібернетичного підходу: об'єкт, зворотній зв'язок, алгоритм. У пункті 2.1.2 приведено аналіз стра-

тегій ТОіР і розглянуто принципи, які одержали відображення при обґрунтуванні методологічних основ ухвалення рішення щодо прогнозованої зміни технічного стану.

2.1.1. Опис загальної моделі технічної експлуатації металоконструкцій з урахуванням концепції ризику

Схема управління технічним станом металоконструкцією представлена на рис. 2.1.

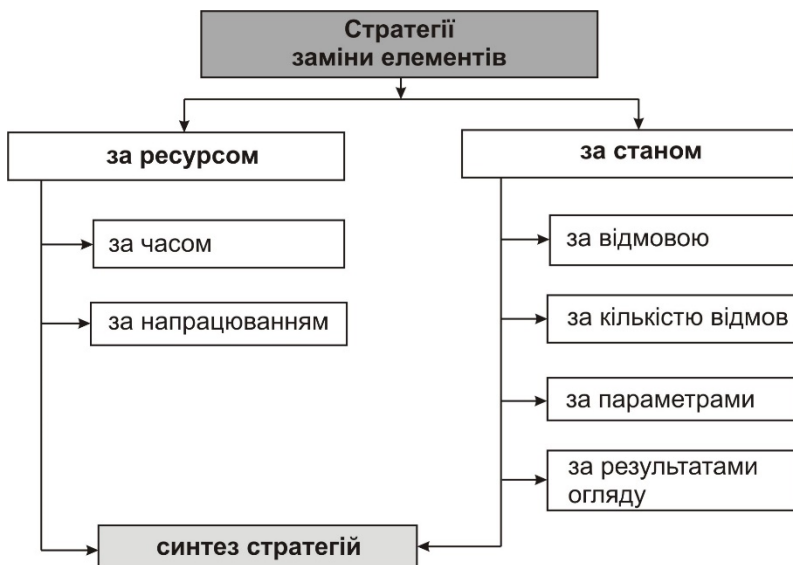


Рис. 2.1. Схема управління технічним станом металоконструкцією

Складність забезпечення високоефективного планового технічного обслуговування і ремонту з використанням середньостатистичних показників надійності, полягає у тому, що через різне поєднання всіх чинників, що впливають на надійність деталей і вузлів ОМПН, останні мають різні закони розподілу напрацювання на відмову.

Розглянемо обґрунтування цього положення. У практичному аналізі надійності зазвичай розглядають залежність ймовірності відмов від часу у вигляді узагальненої U-образної кривої старіння $r(t)$ (рис. 2.2) [54, 66, 70, 77]:

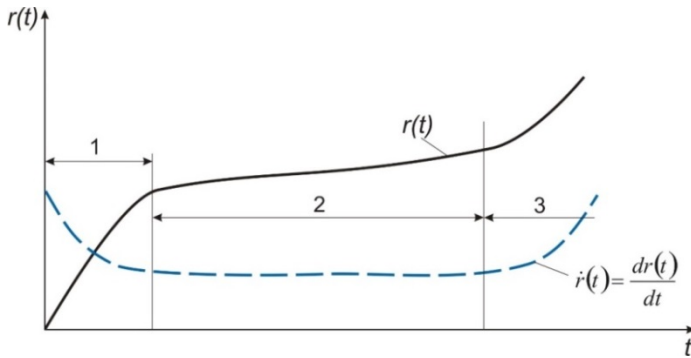


Рис. 2.2. Вид графіка функції вірогідності відмов $r(t)$

Вид єдиної кривої старіння $r(t)$ і її першої похідної – швидкості старіння $\dot{r}(t)$ - дозволяє виділити три ділянки: 1 – ділянка початкового старіння, або прироблення, що характеризується підвищеною величиною швидкості, яка падає з часом; 2 – ділянка нормального робочого старіння, що має постійні значення швидкості старіння; 3 – ділянка катастрофічного старіння. На цій ділянці починається процес швидкого зношування та втрати працездатності агрегату.

Ситуація, коли $r(t) = const$ (друга ділянка), означає що ймовірність безвідмовної роботи характеризується постійним значенням швидкості зносу $\dot{r}(t)$ або старінням елементу, а функція $F(t)$ розподілу напрацювання на відмову є експоненціальною, що відображує раптові значень часу напрацювання на відмову. Тобто в цьому випадку $F(t)$ не може служити основою для прогнозування технічного стану елементу і визначення часу проведення його планового обслуговування.

У цих випадках планові заміни не усувають випадкової відмови, але можуть призвести до зниження надійності елементу за рахунок режиму "прироблення", при яких $r(t)$ практично завжди збільшується, що веде до ризику виникнення раптових відмов.

У такому разі необхідно мати систему індикаторів: ознак, по яких обладнання слід бракувати.

Проте, використовуючі відомі закони розподілу випадкових впливів, неможливо ні за яких фіксованих наборів параметрів теоретично одержати таку криву, яка б описувала залежності, що практично спостерігаються. Але можна побудувати функцію інтенсивності зносу, виходячи з її поведінки.

Функція інтенсивності зносу має вигляд:

$$r = \frac{F'}{l - F}. \quad (2.1)$$

Розглянемо функцію $F(t)$ наступного вигляду:

$$F = 1 - e^{-\int_0^t r(t) dt}, \quad (2.2)$$

де

$$r = \frac{a}{t + t_1} + kt + b \quad (2.3)$$

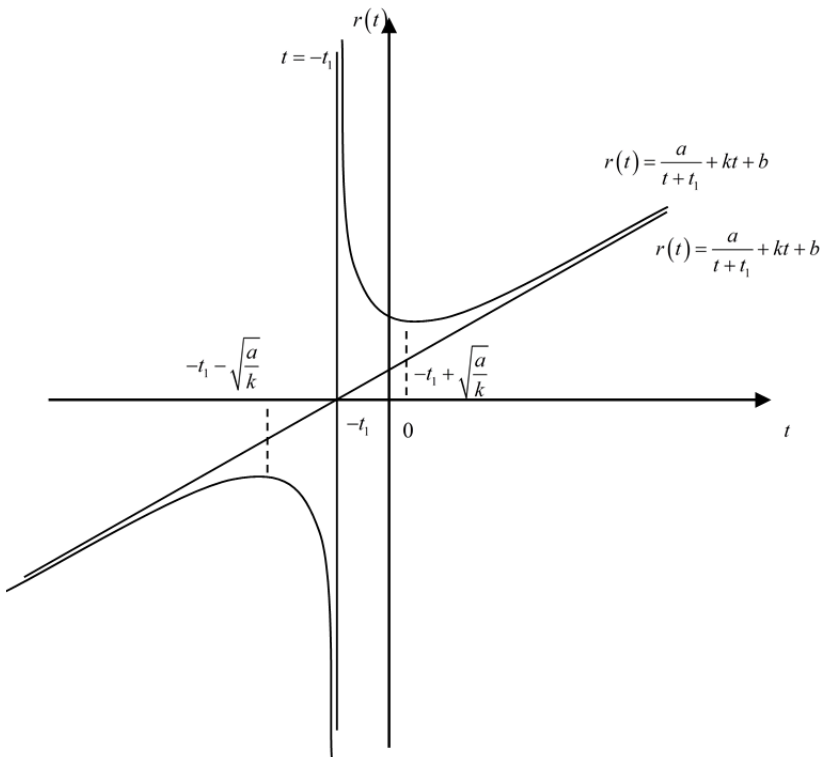


Рис. 2.3. Побудова графіка функції $r(t)$

Виходячи з дослідження функції, можна побудувати її графік. Він приведений на рис. 2.3.

Отриманий графік складається з двох частин. Вимогам, що пред'являються до U-образної кривої (позитивність другої похідної), задовольняє тій частині кривої, при якій $t > -t_I$. Як видно з дослідження функції, вона має мінімум в єдиній точці $t = -t_I + \sqrt{\frac{a}{k}}$ (рис. 2.4).

Проте, як показано на рис. 2.2, функція інтенсивності зносу досягає мінімуму не в одній точці, а на деякому відрізку $t \in [t_{min}^0; t_{min}^I]$.

Ця невідповідність не є суперечністю. Це і відображається графіком, що зображений на рис. 2.5.

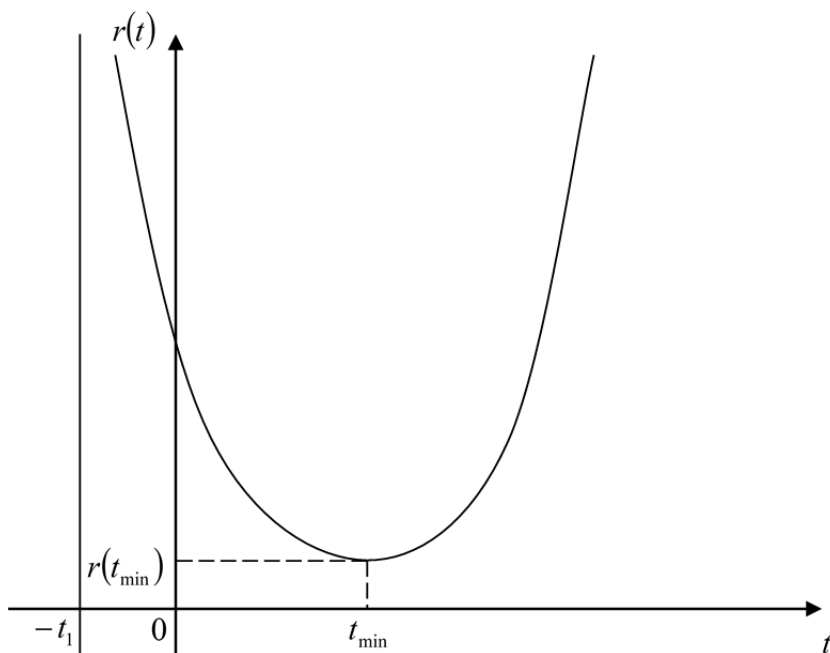


Рис. 2.4. Графік функції $r(t)$

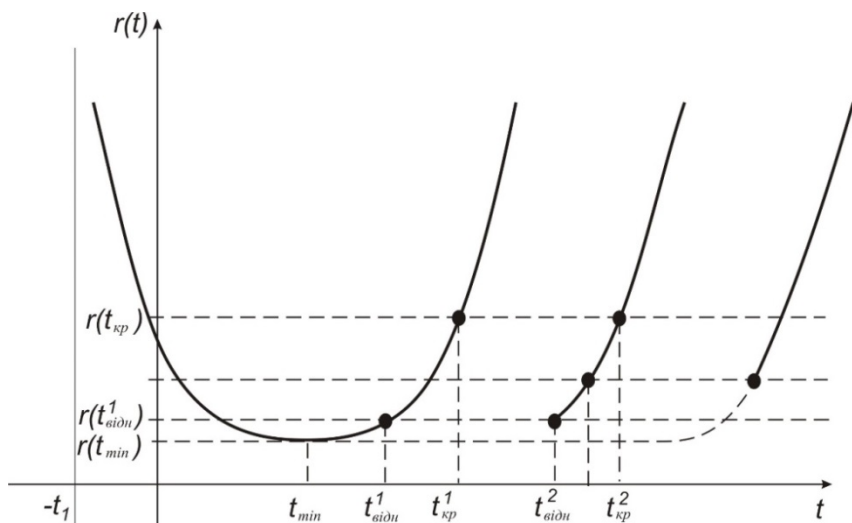


Рис. 2.5. Схема утворення U-образної кривої інтенсивності відмов

Визначимо час «збереження» значення інтенсивності зносу постійним.

Оскільки

$$\int_0^t r(t) dt = a \ln(t + t_1) + \frac{kt^2}{2} + bt \Big|_0^t = a \ln\left(\frac{t + t_1}{t_1}\right) + \frac{kt^2}{2} + bt,$$

то

$$e^{-\int_0^t r(t) dt} = e^{-a \ln\left(\frac{t+t_1}{t_1}\right)} \cdot e^{-\frac{kt^2}{2}} \cdot e^{-bt} = \left(\frac{t_1}{t+t_1}\right)^a \cdot e^{-\frac{kt^2}{2}} \cdot e^{-bt}$$

Отже,

$$F(t) = 1 - \left(\frac{t_1}{t+t_1}\right)^a \cdot e^{-\frac{kt^2}{2}} \cdot e^{-bt}$$

i

$$F' = (1 - F)r = \left(\frac{t_1}{t + t_1} \right)^a \cdot e^{-\frac{kt^2}{2}} \cdot e^{-bt} \cdot r(t),$$

де $r(t) = \frac{a}{t + t_1} + b + kt$.

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F}\right) = \int_0^t r(t)dt = a \ln\left(\frac{t + t_1}{t_1}\right) + \frac{kt^2}{2} + bt$$

Таким чином, чим менше k і більше a , тим більше розтягнута по осі абсцис U-образна крива, тобто тим більший проміжок часу інтенсивність зносу системи залишається постійною.

Для знаходження точкових оцінок параметрів закону розподілу застосований принцип максимуму функції правдоподібності. Замінивши t_1 на θ , одержимо

$$f = F' = \left(\frac{\theta}{t + \theta} \right)^a \cdot e^{-\frac{kt^2}{2}} \cdot e^{-bt} \cdot \left(\frac{a}{t + \theta} + b + kt \right).$$

Вимагається по вибірці $\{t_i\}$ об'єму n знайти такі значення параметрів θ , b , k , щоб вірогідність спостерігати наявну вибірку була максимальною. Це реалізується, коли функція правдоподібності, рівна

$$L(\theta, a, b, k) = \prod_{i=1}^n f(t_i), \text{ досягає максимуму. Послідовно знаходимо:}$$

$$\prod_{i=1}^n f(t_i) = \frac{\theta^{na}}{\prod (t_i + \theta)^a} \cdot e^{-\frac{k}{2}\sum t_i^2} \cdot e^{-b\sum t_i} \cdot \prod \left(\frac{a}{t_i + \theta} + b + kt_i \right),$$

$$L(\theta, a, b, k) = \theta^{na} \cdot \prod_{i=1}^n (t_i + \theta)^{-a} \cdot \prod_{i=1}^n \left(\frac{a}{t_i + \theta} + b + kt_i \right) \cdot \exp \left\{ -\frac{k}{2} \sum t_i^2 - b \sum t_i \right\},$$

$$L = \ln L = na \ln \theta - a \sum_{i=1}^n \ln(t_i + \theta) + \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{a}{t_i + \theta} + b + kt_i \right) - \frac{k}{2} \sum t_i^2 - b \sum t_i.$$

Одержимо наступну систему рівнянь правдоподібності:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{na}{\theta} - a \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i + \theta} + \sum_{i=1}^n \frac{-\frac{a}{(t_i + \theta)^2}}{\frac{a}{t_i + \theta} + b + kt_i} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial a} = n \ln \theta - \sum_{i=1}^n \ln(t_i + \theta) + \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{t_i + \theta}}{\frac{a}{t_i + \theta} + b + kt_i} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial b} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{a}{t_i + \theta} + b + kt_i} - \sum t_i = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial k} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\frac{a}{t_i + \theta} + b + kt_i} - \frac{1}{2} \sum t_i^2 = 0, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \frac{t_i + \theta}{a + (b + kt_i)(t_i + \theta)} = \sum t_i, \\ \sum \frac{t_i(t_i + \theta)}{a + (b + kt_i)(t_i + \theta)} = \frac{1}{2} \sum t_i^2, \\ \sum \frac{1}{t_i + \theta} + \sum \frac{1}{(t_i + \theta)[a + (b + kt_i)(t_i + \theta)]} = \frac{n}{\theta}, \\ \sum \frac{1}{a + (b + kt_i)(t_i + \theta)} + n \ln \theta = \sum \ln(t_i + \theta). \end{array} \right.$$

Утворюємо суму квадратів нев'язності в кожному з рівнянь системи:

$$\begin{aligned} \Phi(a, b, k, \theta) = & \left(\sum \frac{t_i + \theta}{a + (b + kt_i)(t_i + \theta)} - \sum t_i \right)^2 + \\ & + \left(\sum \frac{t_i(t_i + \theta)}{a + (b + kt_i)(t_i + \theta)} - \frac{1}{2} \sum t_i^2 \right)^2 + \\ & + \left(\sum \frac{1}{t_i + \theta} + \sum \frac{1}{(t_i + \theta)[a + (b + kt_i)(t_i + \theta)]} - \frac{n}{\theta} \right)^2 + \\ & + \left(\sum \frac{1}{a + (b + kt_i)(t_i + \theta)} + n \ln \theta - \sum \ln(t_i + \theta) \right)^2. \end{aligned}$$

Вимагається знайти такі значення параметрів, які б забезпечували мінімум функціонала $\Phi(a, b, k, \theta)$, який в ідеальному випадку повинен бути рівний нулю.

Для цього необхідно виробити початкову оцінку параметрів.

При $a = 0$, $b = 0$ одержуємо розподіл Релея

$$F = 1 - e^{-\frac{kt^2}{2}} = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}},$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{k},$$

у якого

$$\mu_\xi = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}, (\mu_\xi)^2 = \sigma^2 \sqrt{\frac{\pi}{2}} = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}}}{k}.$$

Початкова оцінка k :

$$k = \frac{\sqrt{e\sigma\pi}}{(\mu_\xi)^2}.$$

При $k = 0$ одержуємо експоненціальний розподіл

$$1 - e^{-bt} = F(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

у якого

$$\mu_\xi = \frac{1}{\lambda},$$

Початкова оцінка b :

$$b = \lambda = \frac{1}{\mu_\xi}.$$

При $k = b = 0$ одержуємо розподіл Парето

$$F(t) = 1 - \left(\frac{t_I}{t + t_I} \right)^a,$$

$$F(t) = 1 - \left(\frac{\theta}{t + \theta} \right)^a,$$

де, $t > 0$.

$$f(t) = \frac{\theta^a \cdot a}{(t + \theta)^{a+1}} = a \cdot \theta^a \cdot (t + \theta)^{-a-1}.$$

Таким чином, знайдена функція інтенсивності зносу, а також параметри, знаючи які, можна її побудувати.

При цьому на ділянці прироблення крива апроксимується експоненціальною функцією, на ділянці прироблення після ремонту – функцією Парето, тобто статистичні характеристики подій, що відбуваються, мають щільність вірогідності вигляду

$$P(t) \sim t^{-(l+\alpha)}, \quad (2.4)$$

який відноситься до степеневих законів розподілу, де показник α звичайно лежить в діапазоні від нуля до одиниці.

Для підтвердження розглянутих положень були проаналізовані результати дослідження надійності ОМПН.

Аналіз відмов обладнання локомотивів, виявив приналежність випадкових величин напрацювання на відмову трьом класам законів розподілу (рис. 2.6).

Нормальному закону розподілу ($P(t) \sim e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}$ - крива 1) підкоряються випадкові величини часу напрацювання на відмову елементів і вузлів ОМПН, що втрачають свою працездатність в результаті поступового зношування. Експоненціальному (крива 2) – випадкові величини часу напрацювання, але таких деталей і вузлів, для яких характерні раптові відмови. Крива 2 відображає закон розподілу, при якому щільність розподілу $P(t)$ випадкової величини напрацювання визначається залежністю:

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$$

де a і b – позитивні постійні величини. Величина " a " є напрацюванням, що відповідає вірогідності безпечної роботи $P(a) = \exp(-1) = 0,368$ (незалежно від величини " b "). На рис.2.6 і

2.7 крива 2 відповідає випадку, коли $b < 1$ і закон Вейбулла близький до експоненціального, і відображає характер залежностей $F(t)$ і $P(t)$ для деталей і вузлів з прихованим, поволі протікаючим процесом накопичення пошкодження.

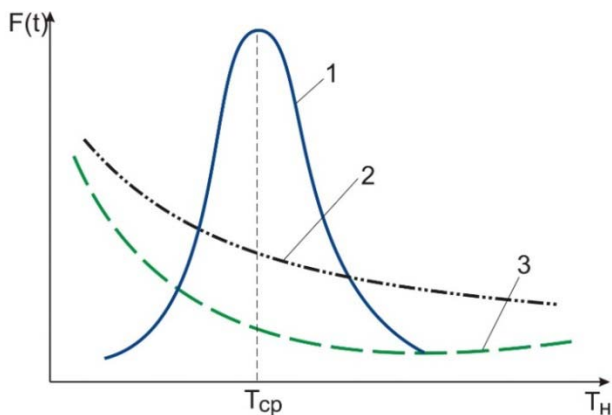


Рис. 2.6. Ймовірність безпечної роботи обладнання при нормальному (1), експоненціальному (2) та ступеневому (3) законах розподілу

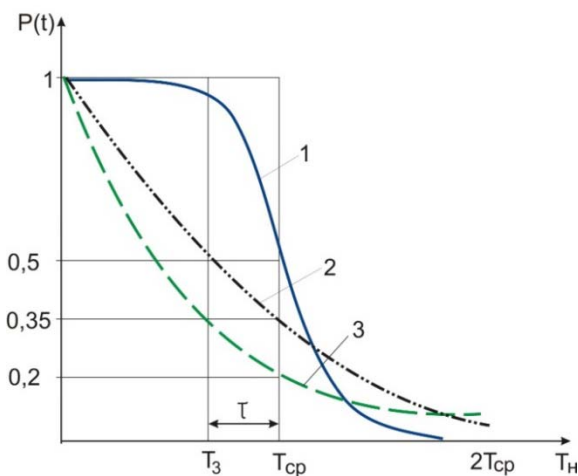


Рис. 2.7. Графіки щільності розподілу випадкових змінних напрацювання на відмов при нормальному (1), експоненціальному (2) та ступеневому (3) законах розподілу

Ступеневій статистиці підкоряються випадкові величини напрацювання обладнання, яке знаходиться в червоній зоні ризику і відноситься до класу обладнання, лімітуючого міжремонтні пробіги.

З графіків $P(t)$ для цих законів видно, що якщо вести планові попереджувальні заміни елементів 1, 2, 3 через середній час напрацювання T_{cp} , то до часу їх заміни відбудеться відмова 50% елементів 1 (нормальний закон), 65% елементів 2 (експоненціальний закон) і 80% елементів 3 (розподіл Парето).

Проте, якщо вести заміни деталей через час $T_3 = T_{cp} - \tau$, вийдуть з ладу тільки 2% елементів 1, тобто для елементів 1 можна забезпечити такий режим ТОіР, при якому практично будуть виключені відмови. Для елементів 2 і 3 навіть при $T_3 = T_{cp} - \tau$ проводити планові попереджувальні заміни малоефективно.

Такий простий алгоритм контролю не може бути достатньо достовірним.

Різниця між нормальним і ступеневим законами розподілу носить не формальний, а принциповий характер [25, 76] (рис. 2.8). Якщо статистика системи описується нормальним законом розподілу, то понад 99,7% подій відхиляється від середнього значення m не більше ніж на 3σ (т.з. правило трьох сигм), а, скажімо, за 5σ вибивається і зовсім менше однієї події на мільйон. При цьому з'являється можливість "законно" нехтувати дуже крупними подіями, вважаючи їх практично неймовірними, тобто можна «відрізати» хвіст розподілу. У разі розподілів з важкими хвостами вибіркові середні нестійкі і малоінформативні через непридатність закону великих чисел.

В термінах оцінки безпеки і ризику хвіст розподілу відповідає так званим гіпотетичним аваріям [15, 38], можливість яких, як слідує вже з самої назви, на практиці не враховується [24, 27, 35, 45, 61, 81, 82].

У міру збільшення числа зареєстрованих подій n їх вибіркове середнє
$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$
 прагне до математичного очікування [36], а

воно при $\alpha < 1$ нескінченне. Нелінійне і збільшуване з часом наростання сумарного збитку пояснюється визначальним впливом на його значення величини збитку від найбільшої події [34, 36]. При $\alpha < 1$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{\max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}} = \frac{1}{1 - \alpha},$$

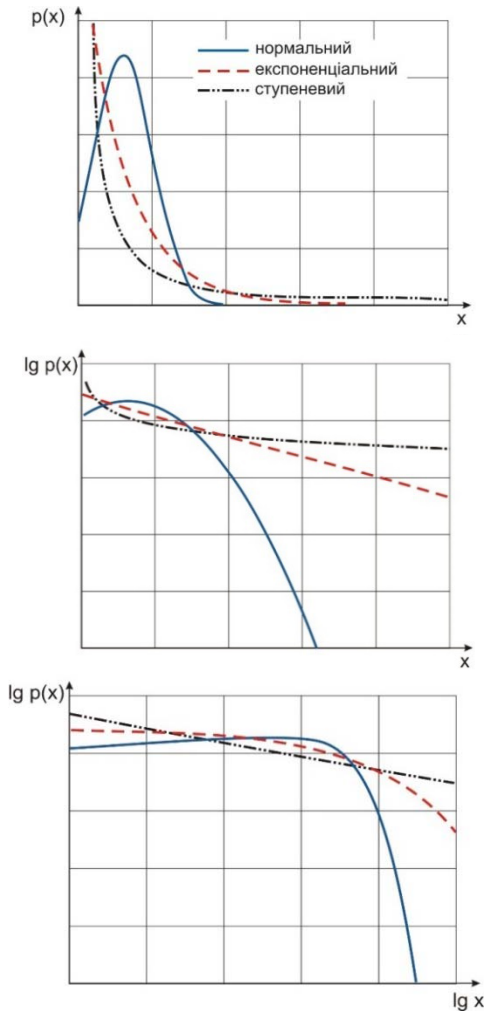


Рис. 2.8. Типовий вид щільності ймовірності величин, розподілених відповідно до нормального, експоненціального і ступеневого законів, з різним представленням даних по осях: (верхній графік дозволяє порівняти швидкість спаду щільності ймовірності для хвостів розподілів. На середньому (логарифмічний масштаб по осі ординат) нормальний і експоненціальний розподіл представляються, відповідно, у вигляді параболи і прямої. А на нижньому (подвійний логарифмічний масштаб) вид прямої має ступеневий закон розподілу, що говорить про скейлінгову поведінку, тобто про відсутність виділених характерних масштабів)

тобто в суму випадкових величин, розподіл яких має хвіст вигляду (2.4) з $\alpha < 1$, з точністю до коефіцієнта, внесок вносить лише максимальний доданок (тоді як для величин з кінцевим середнім внеском будь-якого окремого доданку в суму прагне до нуля).

Внаслідок вказаних причин ухвалення рішення буде об'єктивнішим не за порогом, а за статистичною характеристикою, що характеризує масштаб можливої події

$$Sc\ x = \mu_2 / \mu_1, \quad (2.5)$$

який є середнім, узятим з вагою x , тобто визначає характерний розмір крупної події, або схильність системи до ризику [12, 39].

Алгоритм ухвалення рішення модифікується далі на основі витратного критерію [5, 69]. Ця задача розв'язується нижче в підрозділі 2.2.1.

Тепер можна представити управління як результат роботи алгоритму

2.1.2. Формалізований опис моделей призначення стратегій ТОiP в межах вимог концепції управління ризиком

Концепція управління ризиком при технічному обслуговуванні і ремонті ОМПН визначається не тільки головною метою технологічного процесу їх експлуатації, але і, відповідно до принципу прийнятного ризику [28, 36, 39, 60], про що було сказано вище.

В основу принципу вибору цільових показників досягнення мети управління технічною експлуатацією ОМПН на основі концепції ризику може бути прийнято, як було показано в другому розділі, економічну модель ефективної стратегії технічної експлуатації, організовану на узагальнених рівнях декомпозиції дослідження, а також динамічну модель зміни технічного стану системи, яка характеризує якість функціонування системи з точки зору такої міри як стійкість [2, 23, 65]. Ці дослідження організовуються на детальному рівні декомпозиції і є надзвичайно важливим, оскільки виявляють закономірності, пов'язані з аналізом характеру невизначеностей початкових умов і, отже, з безпекою експлуатації і, таким чином, з адаптацією до змінності впливаючих факторів.

Оскільки даний підрозділ присвячений узагальненим дослідженням, зупинимося на першому аспекті.

Функціонал, що мінімізується, – ризик - за своєю суттю є сума добутків вартості операцій технічного обслуговування на вірогідність проведення відповідної операції в процесі експлуатації [5, 69].

Що стосується кількісних характеристик інформації про витрати, то обчислення їх є прерогативою економічних досліджень [9, 28, 41, 49, 50, 51, 52, 74, 76, 62]. Нас же цікавить задача підвищення ефективності технічного обслуговування з погляду мінімізації цих витрат.

Питомі витрати, пов'язані із зміною контрольованого параметра, незалежно від виду стратегії, можуть бути знайдені на підставі теореми про повне математичне очікування для ергодичних марківських ланцюгів у вигляді [22]:

$$M[C] = \sum_{i=1}^F \sum_{S=1}^F \sum_{j=1}^F \pi_i D_{is} Q_{is} (t_{sj} + z_{sj}) + \sum_{i=1}^F \sum_{S=1}^F \pi_i D_{is} C_{is}, \quad (2.6)$$

де π_i – стандартна ймовірність перебування параметра у стані i . При $i = F$ ймовірність π_F є ймовірністю відмови обладнання в одиницю часу, тобто параметр потоку відмов, ($i = \overline{0, F}$).

Назвемо стан параметра $i = 0$ – новим, а стан F – станом відмови системи. Для кожного стану задано: множина D_{is} , ймовірність того, що в стані i ухвалено рішення S , тобто D_{is} – це матриця допустимих рішень, що приймаються при кожному контролі стану системи: Q_{is} – матриця перехідної ймовірності некерованого ланцюга Маркова [21] з урахуванням вибраного рішення S : C_{is} – витрати, відповідні ухваленому рішенню S .

Хай D_{qi} – ймовірність переведення параметра із стану q в i , $\|g_{ij}\|$ – задана матриця стаціонарної перехідної ймовірності для некерованого ланцюга Маркова [79]. Тоді

$$v_{ij} = \sum_{S=1}^{\infty} Q_{is} D_{sj}, \quad (2.7)$$

де D_{sj} – ймовірність переведення параметра в стан j ;

V_{ij} – матриця ймовірності переходу керованого марківського процесу – є матрицею розподілу часів перебування процесу в стані i при відомому наступному стані, з урахуванням ухваленого рішення S .

Позначимо через π_j – стаціонарну ймовірність перебування ланцюга маркова в стані j . Ймовірність π_j задовольняє наступній системі рівнянь [48]

$$\pi_j - \sum_{i=0}^F \sum_{S=0}^F \pi_i v_{ij} d_{is} = 0;$$

$$\sum_{j=0}^F \pi_j = I, \pi_j \geq 0.$$

Математичне очікування часу перебування початкового процесу в стані j при ухваленому рішенні S : $\eta_j^{(S)} = \sum_{j=0}^F v_{ij} b_{ij}$, де

$b_{ij} = \int_0^{\infty} t dF_{ij}(t)$ – матчікування часу перебування параметра в стані j з урахуванням ухваленого рішення S .

Тут F_{ij} – матриця розподілу часів перебування процесу зміни стану системи в стані i при відомому наступному стані, з урахуванням рішення S .

Увівши позначення $\pi_j d_{js} = x_{js}$ одержуємо для середніх питомих витрат [5] \bar{c} наступний вираз:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{j=0}^F \sum_{S=0}^F \eta_j^{(S)} r_j^{(S)} x_{js}}{\sum_{j=0}^F \sum_{S=0}^F \eta_j^{(S)} x_{js}}; \quad (2.8)$$

$$\sum_{S=1}^F x_{js} - \sum_{i=0}^F \sum_{S=1}^F v_{ij}^{(s)} x_{js} = 0,$$

$$s = 1, \dots, F, \quad j = 0, \dots, F \quad (2.9)$$

$$\sum_{j=0}^F \sum_{S=0}^F x_{js} = 1$$

де $r_j^{(s)}$ – витрати в одиницю часу, відповідно до ухваленого рішення S .

Тепер задача зводиться до вибору змінних x_{js} , так, щоб мінімізувати цільову функцію (2.8) при виконанні обмежень (2.5).

Зробимо далі ряд зауважень. Визначивши значення $M[C]$, ми одержуємо необхідні і достатні умови для формулювання задачі по відшукуванню рішень, які забезпечать мінімальні значення середніх питомих витрат (мінімальний ризик [5, 47, 48] з погляду економічної ефективності експлуатації ОМПН). Вирішивши рівняння (2.5) одержимо ймовірність D_{is} . Ця вірогідність задає рішення D_{is} , при яких з'являється визначеність в результатах контролю, що полягає у тому, що якщо даний агрегат локомотива знаходиться в стані i , то можна прийняти с деякими ймовірностями D_{is} будь-яке з S можливих рішень. При ухваленні такого правила очікувані питомі збитки, що приходяться на одиницю часу експлуатації ОМПН, будуть мінімальні.

Превентивна дія при цьому полягає в проведенні аналізу стану, і обов'язковому призначенні заходів щодо попередження погіршення стану агрегата локомотива.

2.2. Забезпечення показників безвідмовності за критерієм ризику очікуваних витрат

Проведений вище аналіз проблемної ситуації показав, що перехід до прогнозу і попередження небезпечних станів ОМПН повинен забезпечуватися обов'язковим взаємозв'язком підсистем-складових системи управління безпекою експлуатації: ефективності і ризику. Ланкою ж цього взаємозв'язку виступає аналіз ризику очікуваних витрат, реалізація

якого вимагає рішення задачі розробки стратегії технічного обслуговування в рамках концепції ризику.

Викладення досліджень в даному підрозділі побудовано таким чином. Спочатку розглянуто загальну модель експлуатації ОМПН з урахуванням обмежень на ресурси (пункт 2.2.1), далі обґрунтовується стратегія управління ризиками і пропонується критерій ефективності прогнозуючого контролю відмов при діагностиці технічного стану (пункт 2.2.2), а потім в пункті 2.2.3 приводиться порівняльна оцінка ефективності запропонованої та існуючої стратегій.

2.2.1. Побудова математичної моделі експлуатації ОМПН, що мінімізують ризик збитку

Розглянемо систему, можливі стани якої утворюють фазовий простір E_I . У момент часу $t \geq 0$ стан системи позначимо $Z(t)$. Система схильна до відмов. Позначимо підмножину станів відмови Δ_I , $\Delta_I \subset E_I$. Безліч працездатних станів системи позначимо $E_0 = E_I - \Delta_I$. На відновлення системи після відмови витрачається деякий випадковий час $\Theta \geq 0$ по закінченню якого функціонування системи продовжується.

Якщо відлік вести від останньої точки відновлення, то момент виникнення відмови $\xi > 0$. Загальна довжина циклу складає випадковий час $\xi + \Theta$. Із загальної теорії процесів відновлення [5, 18, 47, 48] відомо, що основні характеристики цих процесів можуть бути розраховані шляхом аналізу одного циклу відновлення. Структура протікання процесу на одному циклі відновлення описується таким чином [47]. Вестимемо відлік часу від моменту відновлення, тобто вважатимемо для такого моменту $t = 0$. Від того моменту до моменту відмови ξ є моменти часу $t_0 = 0 < t_1 < t_2 < \dots < \xi$. З функціонуванням системи пов'язаний кількісний витратний показник – показник ефективності.

Позначимо T клас можливих моментів проведення техобслуговування. У разі відмови ремонт здійснюється в обов'язковому порядку, отже, для будь-якого моменту $\tau \in T$ ремонт проводиться у момент часу $\tau \wedge \xi = \min(\tau, \xi)$.

Наявність параметра витрат призводить до того, що даний процес стає процесом накопичення. Відомо, що питомі витрати для такого процесу дорівнюють відношенню середніх витрат за цикл відновлення до середньої довжини циклу. Звідси витікає, що питомі витрати визначаються наступною формулою

$$\psi(\tau) = \frac{M_c g(Z(\tau), \tau)}{M_G(\tau + \Theta(Z(\tau), \tau))}, \quad (2.10)$$

де $g(Z(\tau), \tau)$ – витрати, які визначаються функцією стану системи $Z(\tau)$ у момент часу τ , відповідний відмові ξ . Тривалість усунення відмови Θ так само є випадковою функцією цих змінних: $\Theta = \Theta(Z(\tau), \tau)$.

Позначимо чисельник $\psi_1(\tau)$, а знаменник $\psi_2(\tau)$

$$\begin{aligned} \psi_1(\tau) &= M_c g(Z(\tau), \tau) \\ \psi_2(\tau) &= M_G(\tau + \Theta(Z(\tau), \tau)) \end{aligned}$$

тоді

$$\psi(\tau) = \psi_1(\tau) / \psi_2(\tau).$$

Тут $\psi_2(\tau)$ – середня довжина циклу відновлення, а $\psi_1(\tau)$ – середні витрати за цикл. Стратегія буде оптимальною, якщо

$$\psi(\tau) = \psi^* = \sup \psi(\tau)$$

Розглянемо функціонал

$$\begin{aligned} \Phi_\psi(\tau) &= \psi_1(\tau) - \psi \psi_2(\tau), \\ \psi &\leq \psi^*. \end{aligned}$$

Стратегія технічного обслуговування, орієнтована на ризик, мінімізує

$$\Psi(\tau) = \Psi_1 \tau / \Psi_2(\tau), \quad \text{тоді,} \quad \text{коли}$$

$$\Phi_{\Psi}(\tau) = \Psi_1(\tau) - \Psi(\tau)\Psi_2(\tau) \leq 0.$$

Розглянемо далі при сформульованих припущеннях задачу знаходження стратегії, що мінімізує ризик збитку.

2.2.2. Розробка стратегії прогноуючого контролю при управлінні ризиками

Далі розглянемо побудову структури ремонтного циклу конструкції з урахуванням ризику [38, 47, 48, 81].

Хай поведінка «старіючого» вузла конструкції в часі описується векторним випадковим процесом $X(t)$. Складові процесу $X(t)$ можуть змінюватися безперервно або стрибкоподібно (при накопиченні пошкодженості в елементах вузла).

За станом процесу у фіксований момент часу t можна однозначно визначити факт справності (або несправності) агрегату. Звичайно процес $x(t)$ спостерігається дискретно з інтервалом Δt в моменти часу $t_k = k\Delta t, k = 0, 1, 2, \dots$, тобто спостерігається послідовність випадкових векторів $\bar{X}_0, \bar{X}_1, \dots, \bar{X}_k, \dots$. Значить в кожен момент часу t_k стає відомою вся минула траєкторія випадкового процесу $x(t)$:

$$(x_0, x_1, \dots, x_k) = \bar{X}_k.$$

З практики експлуатації відомо, що в момент t_k на спостережуваній траєкторії \bar{X}_k можна ухвалити тільки два рішення: або не втручатися в роботу системи і продовжити експлуатацію агрегату і спостереження за процесом, або припинити роботу системи і шляхом ремонтних дій повернути систему в початковий стан [14, 29, 32, 72, 67]. У момент відмови агрегату, тобто при $X_0 \in X_+, \dots, X_{k-1} \in X_+, X_k \in X_-$, ухвалюється друге рішення (тут X_+ – простір справних станів агрегату, X_- –

простір його несправних станів, $X = X_+ \cup X_-$ – весь простір станів).

Введемо функцію експлуатаційних втрат системи [2]. Хай C_1 – середні втрати у разі, коли у момент зупинки системи вона справна, а C_2 – середні втрати у разі, коли система відмовила.

Правилом зупинки [21, 68] системи при спостереженні за процесом $X(t)$ є випадкова величина $\mathcal{U}(x_0, x_1, \dots, x_k, \dots)$, що приймає значення $0, 1, 2, \dots, k, \dots$ (момент зупинки визначається поведінкою процесу $X(t)$, тому він випадковий в часі). Вважаємо, що рішення про зупинку в момент t_k залежить тільки від траєкторії процесу \vec{X}_k до моменту t_k .

Скористаємося байєсівською системою рекурентних рівнянь для мінімального ризику [6, 7, 21]. Хай використовується [5, 47] деяке правило зупинки \mathcal{U} . Кожній можливій траєкторії випадкової послідовності $(x_0, x_1, \dots, x_k, \dots) = \vec{X}_k$ відповідає деяке значення збитку $y_{\mathcal{U}}$. Для правила зупинки \mathcal{U} випадкової величини з розподілом $P\{\nu = k\}$,

$k = 1, 2, \dots$ середні питомі втрати є $y(\mathcal{U}) = \sum_{k=1}^{\infty} P\{\nu = k\} y_k$. Правило \mathcal{U}^*

полягає [4] в мінімізації математичного очікування цього збитку:

$y(\mathcal{U}^*) = \min M [y_{\mathcal{U}(x_1, \dots, x_k, \dots)}(x_1, \dots, x_{\mathcal{U}})]$. Припустимо, що

одержані спостереження (x_1, \dots, x_k) . Тоді поведінка після k -го спостереження повинна бути такою, щоб мінімізувати умовне математичне очікування \mathcal{U} збитку за умови, що одержані вказані спостереження. Функція

$R^{\mathcal{U}}(x_1, \dots, x_k)$ – є ризик після k спостережень. Вид цієї функції залежить від правила зупинки \mathcal{U}^* . Мінімум функції по всіх допустимих \mathcal{U} – є

оптимальний ризик $R^{\mathcal{U}^*}(x_1, \dots, x_k)$. Одержавши k спостережень

(x_1, \dots, x_k) , можна прийняти одне з рішень: провести ще воно спостереження або зупинитися. Допустимо, що прийняте перше з рішень. Тоді маємо $k + 1$ спостереження $(x_1, \dots, x_k, x_{k+1})$. Слідуючи оптимально-

му правилу зупинки [68], зазнаємо збиток, математичне очікування якого

$R^{\cup}(x_1, \dots, x_k, x_{k+1})$. Таким чином, ризик після k спостережень за умови, що буде зроблено ще хоча б одне і після цього застосовано правило зупинки:

$$R^{\cup}(x_1, \dots, x_k) = M\{R^{\cup}(x_1, \dots, x_k, x_{k+1})\}.$$

Припустимо тепер, що ухвалене рішення зупинити процес. Тоді зазнаємо збиток $y_k(x_1, \dots, x_k)$.

Визначимо мінімальний ризик [6]. Якщо $y_k(x_1, \dots, x_k) \leq R^{\cup}(x_1, \dots, x_k)$, то вигідніше зупинити експлуатацію після k спостережень, тобто

$$R^{\ominus*}(x_1, \dots, x_k) = y_k(x_1, \dots, x_k). \quad \text{Якщо ж}$$

$y_k(x_1, \dots, x_k) > R^{\cup}(x_1, \dots, x_k)$, то вигідніше продовжити експлуатацію до наступного спостереження. Об'єднуючи ці два випадки, одержимо рекурентну формулу для мінімального ризику:

$$R^{\cup*}(x_1, \dots, x_k) = \min\{y_k(x_1, \dots, x_k), M\{R(x_1, \dots, x_k, x_{k+1})\}\}$$

Знаючи $R^{\cup}(x_1, \dots, x_k, x_{k+1})$, можна по цій формулі обчислити $R^{\cup*}(x_1, \dots, x_k)$. Правило зупинки таке: якщо одержані k спостережень (x_1, \dots, x_k) , то обчислюємо значення $y_k(x_1, \dots, x_k)$ і $R^{\cup}(x_1, \dots, x_k)$; при $y_k < R$ припиняємо експлуатацію для проведення відновлювальних заходів; при $y_k > R$, обов'язково робимо хоча б ще одне спостереження; якщо ж $y_k = R$, то обидва рішення (зупинки і продовження експлуатації) рівнозначні в значенні ризику і можна прийняти будь-яке з них [7, 42, 59].

Проте будь-яке рекурентне формулювання вимагає деяких початкових умов: потрібно задати $R(x_1, \dots, x_K)$, тоді можна обчислити

$R(x_1, \dots, x_k)$ при всіх $k < K$. Ефективний метод такого завдання полягає в наступному. Обмежимо число спостережень деяким K і виберемо квазіоптимальне правило зупинки $\nu^{(K)}$ при цьому обмеженні [4]. Відзначивши всі введені вище функції при даному обмеженні індексом (K) , одержимо

$$\begin{aligned} R^{(K)}(x_1, \dots, x_k) &= \min\{y_k(x_1, \dots, x_k), \\ M\{R^{(K)}(x_1, \dots, x_k, x_{k+1})\}, & k < K; \\ R^{(K)}(x_1, \dots, x_K) &= y_K(x_1, \dots, x_K) \end{aligned}$$

Таким чином, процес обчислення $R^{(K)}(x_1, \dots, x_k)$ визначений. Безпосереднє визначення мінімального ризику можливе при виконанні умов [20]:

1. $M[\nu^*] < \infty$;
2. $M[y_k(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k)]^* \begin{cases} \leq y_{k-1}(x_1, \dots, x_{k-1}) & \text{при } k \leq \nu^* \\ \geq y_{k-1}(x_1, \dots, x_{k-1}) & \text{при } k > \nu^* \end{cases}$;
3. $M[|y_k(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k) - y_{k-1}(x_1, \dots, x_{k-1})|] \leq C$,

де C – деяка постійна.

Умови 1 і 3 на практиці виконуються за вжди для задач експлуатації окремих вузлів ОМПН через скінченність витрат і скінченність часу безвідмовної роботи окремих деталей, вузлів та конструкції вцілому.

Розглянемо процедуру перевірки умови (2) [48]. Припустимо, що дискретно контрольований параметр $X(t)$ системи, визначаючий в процесі експлуатації її працездатність, змінюється монотонно. Допустима область зміни $X(t)$ задана співвідношенням $0 \leq X(T) \leq L$, де L - верхня межа допуску на параметр системи. Параметр контролюється в дискретні моменти часу $t_k = k\Delta t$, $k = 0, 1, 2, \dots$, утворюючи послідовність незалежних випадкових величин із загальною функцією розподілу $F(x) = P\{\Delta X_k < x\}$, де ΔX_k - приріст процесу по кроках контролю $k = 1, 2, \dots$.

Функція збитку на k -му кроці

$$y_{k-1}(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k) = \begin{cases} C, & \text{если } X(t_k) \leq L, \\ C + A, & \text{если } X(t_k) > L, \end{cases}$$

де C – середні втрати на регулювання параметра $X(t)$, якщо він знаходиться усередині поля допуску L ; $C + A$ – середні втрати, якщо параметр $X(t)$ вийшов за межі поля допуску $(0; L)$ – аварійний ремонт.

Природньо припустити, що у момент контролю t_{k-1} відомі всі природи параметра $X(t)$ і процес знаходиться нижче за рівень L . Величина $y_{k-1}(x_1, \dots, x_{k-1}, X_k)$ є випадковим збитком внаслідок того, що збитки C і $C + A$ виникають на кожному кроці спостереження з певною вірогідністю, що має місце при зупинці експлуатації на $(k - 1)$ -му кроці. Введемо питомий збиток, позначивши через t_z – момент виходу процесу $X(t)$ за рівень L :

$$\hat{y}_k(x_1, \dots, x_{k-1}, X_k) = \begin{cases} C/t_k, & \text{если } t_k < t_z \\ C + A, & \text{если } t_k \geq t_z. \end{cases}$$

Для умовного математичного очікування питомого збитку для k -го кроку спостереження процесу $X(t)$ за умови, що прирощення процесу спостерігалися до $(k - 1)$ -го кроку включно і в момент t_k він буде зупинений, застосовуючи формулу повної вірогідності, маємо

$$\begin{aligned} M[\hat{y}_k(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{k-1}, \Delta X_k)] &= \\ &= \frac{C}{t_k} P\{\Delta X_k < L - X(t_{k-1})\} + \\ &+ \frac{C + A}{t_k} [1 - P\{\Delta X_k < L - X(t_{k-1})\}] = \\ &= \frac{C}{t_k} + \frac{A}{t_k} [1 - P\{\Delta X_k < L - X(t_{k-1})\}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

де A – додатковий збиток через відмову системи, а записи $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{k-1}$ відносяться до спостережуваних значень відповідних випадкових прирощень $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_{k-1}$.

Оптимальне правило ν^* вводиться, використовуючи лексику Дуба [20], що встановлює обмеження на випадковий процес $X(t)$. Це обмеження полягає в наступному. Характерною межею процесів, що відображають стан системи для тривалої експлуатації, є їх монотонність за вірогідністю відмови. Переконаємося, що в даному випадку виконується умова 2. Запишемо цю умову для $k \geq 0$ і питомого збитку \hat{y}_k :

$$M = [\hat{y}_k (\Delta x_1, \dots, \Delta x_{k-1}, \Delta X_k)] \leq \hat{y}_{k-1} (\Delta x_1, \dots, \Delta x_{k-1}), \quad (2.12)$$

якщо систему зупинити не пізніше моменту ν^* , тобто при $k - 1 \leq \nu^*$;

$$M = [\hat{y}_k (\Delta x_1, \dots, \Delta x_{k-1}, \Delta X_k)] \geq \hat{y}_{k-1} (\Delta x_1, \dots, \Delta x_{k-1}), \quad (2.13)$$

якщо експлуатацію системи перервати не раніше моменту ν^* , тобто при $k - 1 \geq \nu^*$.

Умова (2.12) виконується при

$$1 - P\{\Delta X_k < L - X(t_{k-1})\} \leq \frac{C}{A(k-1)}. \quad (2.14)$$

Насправді, підставляючи в (2.11) вираз (2.14), зразу ж одержуємо (2.12).

Умова (2.13) виконується при

$$1 - P\{\Delta X_k < L - X(t_{k-1})\} \geq \frac{C}{A(k-1)}. \quad (2.15)$$

Підставляючи в (2.11) вираз (2.15), переконуємося, що (2.13) вірне.

Якщо k^* є найменше $(k-1)$, при якому вперше виконується (2.15), то $\nu^* = k^*$, що і виходить з умови 2 лексики Дуба [20].

Таким чином, вдається одержати в явному аналітичному вигляді у стратегію прогноуючого контролю збитків по критерію мінімального ризику витрат.

Якщо під параметром стану системи розуміти напрацювання, то пошук стратегії управління ресурсом на основі мінімуму ризику в процесі експлуатації здійснюється по показнику оперативної готовності (вірогідність застати систему в довільний момент часу в справному стані і безвідмовно пропрацювати деякий заданий час).

Експлуатація локомотива в процесі технічного обслуговування в умовах стратегії мінімального ризику збитку повинна здійснюватися через час $\min(t_{k^*}, t_z)$, тобто, або в моменти попереджуючих допусків

(t_{k^*}) , або аварійно (t_z) .

Знайдемо з умови (2.14) рівняння кривої попереджуючого допуску, яке при контролі параметра $X(t)$ повинне закладатися в алгоритм управління безпечною експлуатацією. З (2.14) маємо

$$F(L - X(t_{k-1})) \geq \frac{C}{A(k-1)}.$$

Узявши від обох частин функцію, зворотню F , маємо

$$L - X(t_{k-1}) \geq F^{-1}\left(1 - \frac{C}{A(k-1)}\right),$$

або

$$X(t_{k-1}) \leq L - F^{-1}\left(1 - \frac{C}{A(k-1)}\right) = \varphi(k).$$

Процедуру побудови технічної експлуатації покажемо на прикладі умовного вузла (УВ) металоконструкції.

Слід обмовитися відразу, що представлені результати слід розглядати як ілюстративні, оскільки в розрахункові схеми входять параметри величин витрат, оцінка реальних величин яких є вельми складною задачею і не входять в наші цілі. Крім того, будь-яка математична модель не може абсолютно точно описати виробничу ситуацію, в якій завжди виникає безліч не врахованих моделлю нюансів, і не дає остаточних, не підлягаючих сумніву рішень, а лише допомагає правильно зорієнтуватися в ситуації і відкинути явно програшні неефективні рішення.

Прийmemo такі початкові дані: $C_1 = 200 \text{ грн}$; $C_2 = 2000 \text{ грн}$; $L = 2,2 \text{ мм}$, функція $F(x)$ розподілу випадкових величин приросту процесу $X(t)$, характеризуюча деградацію (збільшення зносу) УВ:

$$F(x) = P\{\Delta x < x\} = 1 - e^{-\lambda x},$$

де $\frac{1}{\lambda} = M[\Delta x_k]$, $k = 1, 2, \dots$

Для того, щоб відтворити процес зміни параметра $X(t)$ в часі, скористаємося методом статистичних випробувань за допомогою таблиці випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі $[0; 1]$ і функції розподілу $F(x)$. В цілях швидкої ілюстрації алгоритму візьмемо (маючи вже результати машинної обробки) великі прирости досліджуваного процесу.

Процедура рахунку полягає в наступному (рис. 2.9). Генератором випадкових чисел обирається число 0,35. Числу 0,35 на рис 2.5 відповідає приріст процесу $X(t_1)$: $\Delta x_1 = 0,70$ одиницю поля допуску L .

Процес $X(t)$ в точках контролю буде рівний $\Delta x_1, \Delta x_1 + \Delta x_2, \dots, \Delta x_1 + \dots + \Delta x_{k-1}$, де $(k-1)$ номер кроку останнього спостереження процесу. Помітимо, що довжина кроку контролю останнього моделювання обирається такою ж, для якої були одержані статичні дані про приріст процесу $X(t)$, використані для побудови функції розподілу $F(x)$ на рис. 2.5. Отже, $x(t_1) = 0,7$.

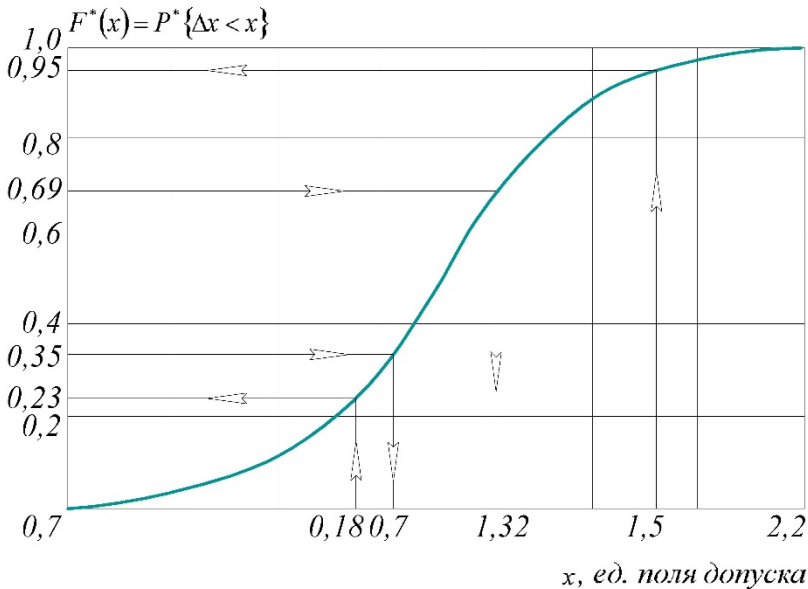


Рис. 2.9. Процедура розрахунку моделі технічної експлуатації

Перевіряємо виконання нерівності (2.14) на першому кроці контролю. Маємо: $k-1=1$, аргумент вірогідності P рівний $L - x(t_1) = 2,2 - 0,7 = 1,5$. Нерівність для першого кроку спостережень

$$1 - P\{\Delta x_2 < 1,5\} \leq \frac{200}{(2000 - 200) \cdot 1} = 0,11.$$

Значення функції P при аргументі 1,5 рівне (рис. 2.5) 0,95. Тому маємо $1 - 0,95 < 0,11$, тобто $0,05 < 0,11$.

Нерівність (2.14) на першому кроці виявилася виконаною, значить експлуатацію продовжуємо. Наступним кроком моделювання буде число 0,69. З рис. 2.5 ясно, що числу 0,69 відповідає приріст $\Delta x_2 = 1,32$, це значить, що на другому кроці процес $x(t_2) = \Delta x_1 + \Delta x_2 = 0,7 + 1,32 = 2,02$. Для другого кроку маємо $k-1=2$; $L - x(t_2) = 2,2 - 2,02 = 0,18$. Нерівність (2.14) запи-

шесться так
$$L - P\{\Delta x_3 < 0,18\} \leq \frac{200}{1800 \cdot 2} = 0,056 ;$$

$$1 - 0,23 = 0,77 > 0,056 .$$

Таким чином, нерівність (2.14) порушилася, значить шукане правило попереджувачої зупинки: $\nu^* = k^* = 2$, і попереджувачий величина умовної тріщини УВ складає 1,32 мм, що відповідає мінімуму очікування відношення сумарних витрат, пов'язаних з проведенням ремонтних робіт, (рис. 2.10).

Рівняння кривої попереджувачого допуску (рис. 2.11), яке при автоматичному контролі параметра $X(t)$ повинне закладатися в ЕОМ [5], в даному випадку має вигляд:

$$\varphi_k = L + \frac{1}{\mu} \ln \left(1 - \frac{C_1}{A(k-1)} \right).$$

У випадку, якщо витрати, викликані відмовою вузла великі, може бути доцільним з ряду причин продовжити експлуатацію вузла і після отримання сигналу про попадання параметра $X(t)$ в зону II (рис. 2.11). В цьому випадку природньо перейти на контроль параметра з меншим кроком спостереження [47], наприклад з кроком $\Delta t_2 = 0,1 \Delta t_1$ і застосувати те ж правило зупинки (рис. 2.12). В цьому випадку змінюється функція $F(x)$, і значення поля допуску, яке стане рівним $L_1 = L - X(k\Delta t)$.

При першому попаданні параметра $X(t)$ (вже в новій системі координат) в зону III знов переноситься початок координат і вибирається менший крок контролю (наприклад. $\Delta t_3 = 0,1 \Delta t_2$), і розглядається попереджувачий допуск для нових значень $F(x)$ і L . Перехід на контроль параметра $X(t)$ з меншим кроком визначається технічними можливостями і ступенем ризику (вірогідністю виходу параметра за граничний допуск). При неодноразовому застосуванні правила (6) відбудеться деяке збільшення напрацювання системи і збільшення витрат на контроль і регу-

лювання параметра $X(t)$. На рис. 2.13 представлена зміна величини $M\left[\frac{c}{\tau}\right]$, одержуваної при триразовому застосуванні правила (6) для УВ.

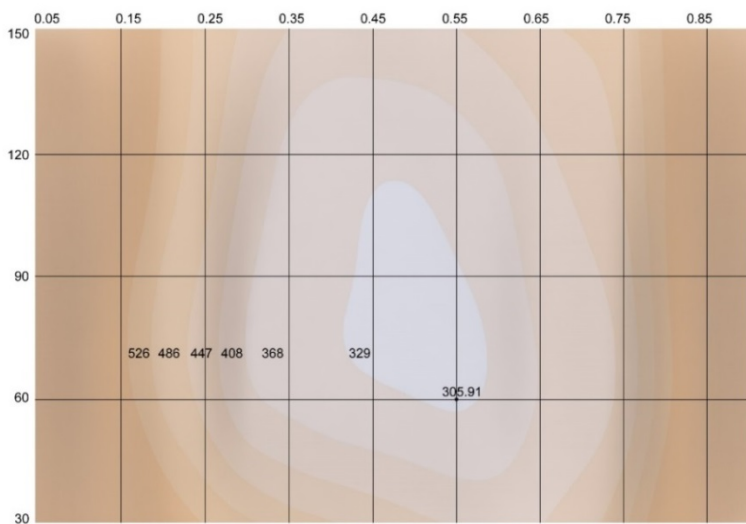
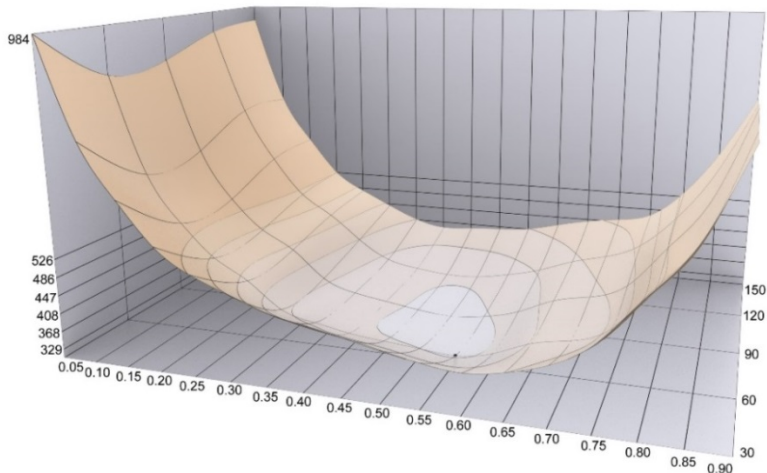


Рис. 2.10. Результати розрахунків стратегії, що мінімізує ризик втрат для УВ

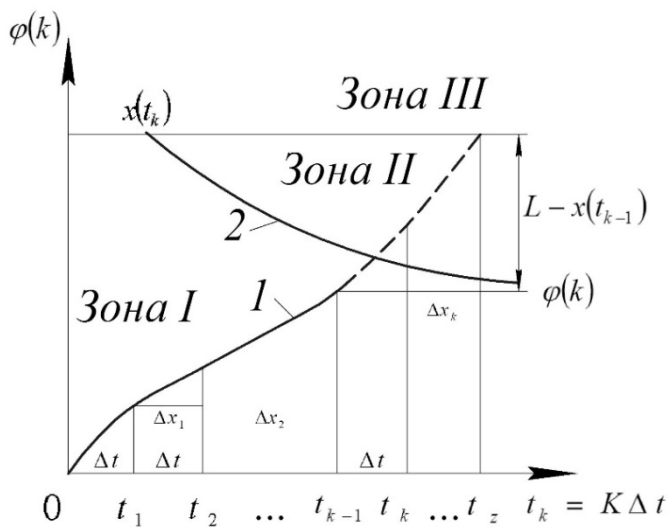


Рис. 2.11. Щодо визначення стратегії прогнозуючого контролю відмови

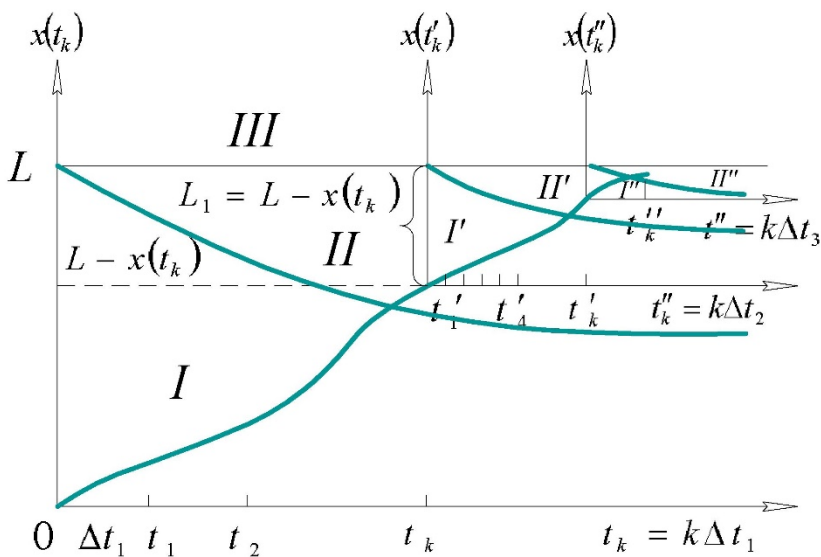


Рис. 2.12. Перехід на контроль параметра з меншим кроком

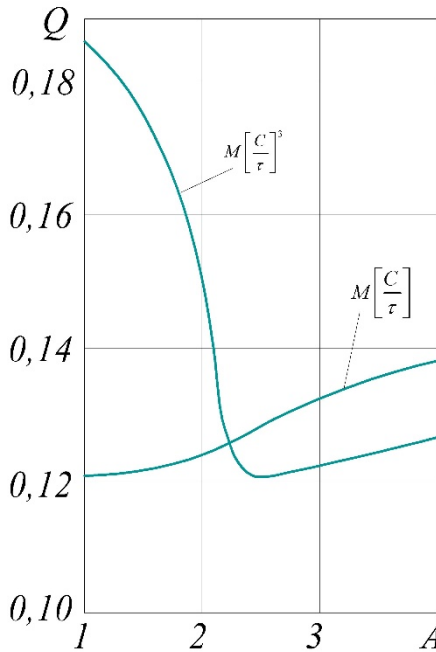


Рис. 2.13. Зміна величини $M\left[\frac{c}{\tau}\right]$, одержуваної при триразовому застосуванні правила (2.14)

Триразове застосування правила (2.14) дозволило збільшити корисне напрацювання УВ в середньому на 20%, проте, при цьому вірогідність виходу параметра $X(t)$ за рівень L зросла при $A < 2000$ на 70%, при $A = 2000$ - на 21,5%, а при $A > 2000$ - на 5%. Це значить, що неодноразове застосування правила (2.14), зокрема для даного вузла (при прийнятих початкових даних) доцільне, коли витрати, викликані раптовою відмовою значно ($A > 2000$) перевищують витрати на контроль і техобслуговування.

Подібний аналіз, проведений для всіх деталей та вузлів, що входять до складу металоконструкції дає основу для підготовки рішення як по відхиленнях, що допускаються, так і по ремонтному циклу з урахуванням поступових відмов.

Для того, щоб можна було порівнювати експлуатаційні показники роботи агрегатів при різних значеннях τ - часу «життя» системи і T

– часу між двома плановими ремонтами, введемо відповідно до (2.10) питомий витратний показник, рівний відношенню сумарних витрат на експлуатацію агрегатів на умовне математичне очікування часу безвідмовної роботи за «час життя» системи t .

Умова мінімуму ризику втрат означає існування $\min U(t, T) = U(t_0, T_0)$. Якісна інтерпретація існування мінімуму $\{(t, T)\}$ допускається представленням функції $U(t, T)$ у відповідних координатах таким чином: для фіксованого часу «життя» системи t перетин поверхні $U(t, T)$ площиною $t = \text{const}$ дає графік залежності $U(T)$ при $t = \text{const}$ наступного вигляду: при зменшенні T загальні і питомі витрати збільшуватимуться за рахунок збільшення частоти планових профілактичних ремонтів. При збільшенні T збільшується вірогідність відмови всієї системи, витрати за рахунок профілактичного ремонту замінюються витратами на аварійне відновлення агрегату після відмови. Вартість відновлення є величина, що зростає при збільшенні термінів міжремонтного періоду. Тому зростання величини T , призводить до різкого збільшення питомих витрат U . З цього випливає існування точки мінімуму залежності $U(T)$ при фіксованому t .

Якщо фіксувати T і розглядати в перетині залежності $U(t)$, то при зменшенні часу t умовне математичне очікування часу безвідмовної роботи необмежено убуває і дріб (U – питомі витрати), із визначення U , необмежено росте. При зростанні t для будь-якого фіксованого значення T умовне математичне очікування має граничну величину – середній час напрацювання на відмову, – але вартість відновлення за рахунок старіння механізму зростає, причому досить різко, починаючи з деякого значення t . Це також приводить до залежності, що має мінімальне значення ризику втрат для деякого часу t .

Таким чином, алгоритм пошуку може бути побудований дослідженням поверхні $U(t, T)$. Для цього математична модель питомого витратного механізму повинна адекватно відобразити побудовану якісну картину. Наперед відзначимо, що наявність аналітичного виразу для питомих витрат $U(t, T)$ не дає автоматичної можливості побудови алго-

ритму рішення системи $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ і $\frac{\partial U}{\partial T} = 0$. Натомість доцільне дослід-

дження одержаної поверхні $U(t, T)$ з метою побудови алгоритму пошуку $\min U(t, T)$, який повинен бути стійкий до перешкод, неминучих в отриманні оцінок параметрів.

Для подальшої деталізації моделі введемо наступні позначення:

t – поточний час (час експлуатації системи, календарний час);

T – період між двома плановими ремонтами;

τ – випадковий час між двома сусідніми відмовами (час напрацювання на відмову);

$F(T)$ – вірогідність відмови за час, тобто $F(t) = P\{\tau < t\}$ – функція розподілу випадкової величини τ ;

$1 - F(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи за час t , тобто це вірогідність події, протилежної розглянутій вище, саме $1 - F(t) = P\{\tau \geq t\}$;

C' – вартість планового профілактичного ремонту;

C'' – вартість відновлення обладнання, несправність якого послужила причиною аварійної зупинки;

$n = \left[\frac{t}{T} \right]$ – число планових ремонтів за час t ;

$$C(t, T) = \frac{(1 - F(T))^n C' n + C'' F(T)}{(1 - F(T))^n + F(T)} \text{ - умовне математичне}$$

оцікування витрат.

Таке визначення величини оцікуваних витрат $C = C(t, T)$ відповідає наступній схемі витратного механізму. Задається час між профілактичними ремонтами T . Якщо до закінчення цього часу система вийшла з ладу, вона ставиться на відновлення, вартість якого рівна C'' з вірогідністю $p_2 = F(T)$. Якщо в проміжку $[0, T]$ система відпрацювала в безаварійному режимі з вірогідністю, то вона ставиться на профілактичний плановий ремонт, ціна якого – C' . За поточний час t буде виконано $n = \left[\frac{t}{T} \right]$ таких ремонтів. Відповідно їх загальна вартість буде рів-

на, а вірогідність їх повторення n раз буде рівна $p_1^n = (1 - F(T))^n$.

Умовне математичне очікування часу безвідмовної роботи за час роботи t рівне:

$$m_t = M(\tau | \tau < t) = \frac{\int_0^t xF'(x)dx}{\int_0^t F'(x)dx} = \frac{I}{F(t)} \int_0^t xF'(x)dx.$$

Питомі витрати $U(t, T)$ будуть рівні $U(t, T) = \frac{C(t, T)}{m_t}$.

Це рівносильно тому, як якщо за скільки завгодно великий проміжок часу «життя» системи t було б розглянуто m таких проміжків часу між аварійними зупинками.

Задаючи експоненціальний закон для часу безаварійної роботи $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, знайдемо $F'(t) = f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$,

$$1 - F(T) = e^{-\lambda T}, \quad (1 - F(T))^n \approx e^{-\lambda T \frac{t}{T}} = e^{-\lambda t}.$$

$$M(\tau | \tau < t) = \frac{1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}}{\lambda(1 - e^{-\lambda t})},$$

$$U(t, T) = \frac{\lambda(1 - e^{-\lambda t})}{1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}} \frac{nCe^{-\lambda t} + C''(1 - e^{-\lambda T})}{e^{-\lambda t} + 1 - e^{-\lambda T}} =$$

$$= \lambda \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}} \frac{1}{1 - e^{-\lambda T} + e^{-\lambda t}} \left[\frac{t}{T} Ce^{-\lambda t} + C''(1 - e^{-\lambda T}) \right]$$

Значення C'' – вартість відновлення після аварійної зупинки залежить від t і T . З підвищенням кожної з цих величин C'' росте. Тому замість C'' в останній формулі запишемо $C'' = C_2(e^{\mu_1 t + \mu_2 T} - 1)$,

де значення μ_1 і μ_2 характеризують інтенсивність зростання вартості відновлення від часу t і від T .

Замінюючи C' на C_1 , остаточно одержимо для питомих витрат $U(t, T)$ вираз у вигляді:

$$U(t, T) = \lambda \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}} \times \\ \times \frac{\frac{t}{T} C_1 e^{-\lambda t} + C_2 (e^{\mu_1 t + \mu_2 T} - 1)(1 - e^{-\lambda T})}{1 - e^{-\lambda T} + e^{-\lambda t}}$$

Характер поверхні $U(t, T)$ представлений на рис. 2.14.

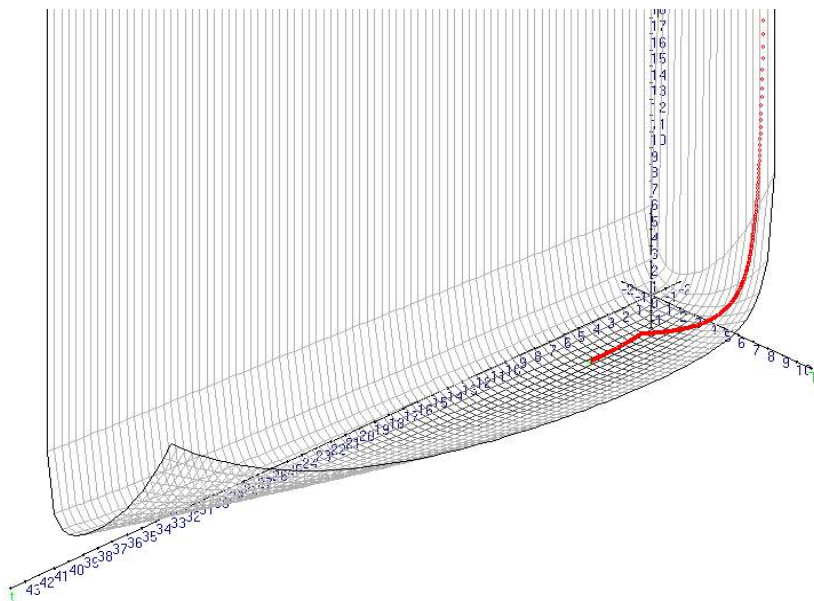


Рис. 2.14. Вид поверхні $U(t, T)$ при довільних значеннях параметрів

Алгоритм знаходження мінімуму функції $U(t, T)$.

Дані, які використовуються в алгоритмі:

1. R_0 – початковий радіус пошуку;
2. R – поточний радіус пошуку;
3. n – розмірність простору;
4. $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$ – координати початку пошуку;
5. (x_1, x_2, \dots, x_n) – координати точки, що перевіряється;
6. λ_1, λ_2 – коефіцієнти масштабу;
7. k – коефіцієнт стягання круга пошуку;
8. ε – точність обчислень;
9. (u_1, u_2, \dots, u_n) – випадкові величини, використовувані при виборі випадкової точки;
10. N – кількість точок, що проглядаються;
11. p – кількість перенесень центру.

Знаходження точки мінімуму:

1. Задаємо початковий радіус пошуку R_0 , початкову точку (x_1, x_2, \dots, x_n) , точність ε і кількість точок N , що проглядаються;

2. Поточною точкою вважаємо початкову, а поточним радіусом – початковий радіус пошуку $R = R_0$, $x = x_0$.

3. У крузі з радіусом R і центром в точці (x_1, x_2, \dots, x_n) вибираємо N випадкових точок $(x_i, i = \overline{1..N})$;

4. З них знаходимо таку x^* , в якій значення заданої функції мінімальне.

5. Якщо значення функції в точці x^* менше ніж в поточній x , то переходимо в цю точку ($x = x_0$), збільшуємо p на одиницю, відновлюємо радіус пошуку до початкового значення ($R = R_0$) і повторюємо дії (3...6), інакше значення радіусу пошуку буде kR .

6. Якщо радіус пошуку стає менше заданої точності, то пошук закінчений і поточна крапка є мінімальною, інакше повторюємо дії (3...6).

Вибір випадкової точки:

1. Хай $\omega_i, i = \overline{1, N}$ – випадкові величини, рівномірно розподілені на інтервалі $(0;1)$;

2. Обчислюємо x_i по формулі:

$$x_i^j = x^j + \xi_j \lambda_j R, \text{ де, } j = \overline{1, n}.$$

На рис. 2.15 показані лінії рівня поверхні $U(t, T)$. В цілому модель відображає як якісну, так і кількісну картину реального процесу формування витратного механізму.

Стосовно металоконструкції в цілому приведений мінімум слід розглянути спільно і по мінімальній сумі знайти цикл, що забезпечує мінімальний ризик витрат як по раптових, так і поступових відмов.

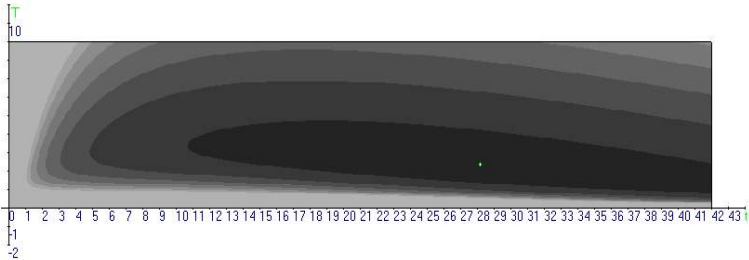


Рис. 2.15. Лінії рівня поверхні $U(t, T)$

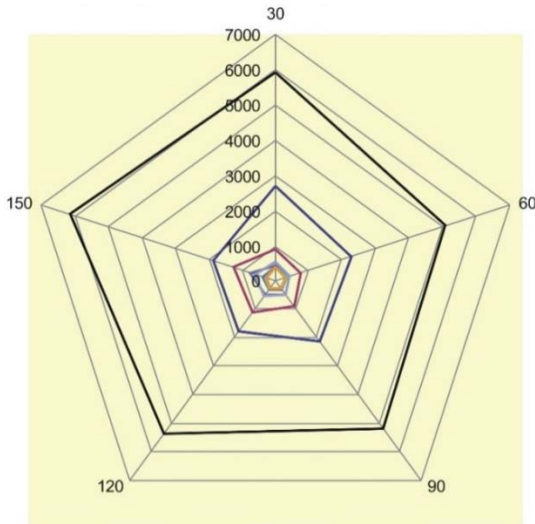


Рис. 2.16. Побудова ремонтного циклу за всіма групами обладнання (кольорові лінії для окремих вузлів, чорна – для металоконструкції в цілому)

2.2.3. Порівняльна оцінка стратегії управління ризиком

Вважаємо, що відмова елементу відбувається миттєво і факт появи відмови зразу ж стає відомим. Елемент може бути замінений справним у порядку профілактики або в аварійному режимі (при відмові). Позначимо відповідні витрати через C_2 і C_1 .

Очевидно, що $C_1 \geq C_2$, оскільки після заміни елементу, що відмовив, часто планують додаткові перевірки.

Визначимо заданий ресурс, як напрацювання, після закінчення якого елемент повинен бути замінений. Показником, по якому обирається задане значення ресурсу елементу, є коефіцієнт оперативної готовності $p(x, t)$. Цей показник має сенс ймовірності застати елемент в справному стані в довільний момент часу t і пропрацювати безвідмовно після моменту t протягом часу x [31,80]. Припустимо, що часи планових замін елементів є реалізаціями деякої випадкової величини Y , що має функцію розподілу $G(t)$. Інтервали між замінами елементів утворюють в часі послідовність незалежних, однаково розподілених випадкових величин. Позначимо математичне очікування числа відновлень до моменту t через $H(t)$.

Припускаємо тривалу експлуатацію системи, тому розглянемо показник $p(x, t)$ при $t \rightarrow \infty$, тобто $p(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} p(x, t)$. Запишемо вираз для $p(x, t)$ через функції $G(t)$, $F(t)$, $H(t)$ [3, 22] і перейдемо до межі при $t \rightarrow \infty$.

Подія, що полягає у тому, що елемент безвідмовно пропрацює в проміжку $(t, t+x)$, є сумою наступних подій: у проміжку $(0, t)$ не планується заміна справного елементу, і в інтервалі $(0, t+x)$ елемент не відмовив (протягом часу оперативної експлуатації ОМПН x його заміна не планується); у момент ξ ($0 \leq \xi \leq t$) закінчилася заміна елементу (справного або після відмови) і далі в інтервалі (ξ, t) не планується заміна справного елементу, а в проміжку часу $(\xi, t+x)$ не відбулося відмов елементу.

Вірогідність першої події така: $[1 - F(t + x)] \cdot [1 - G(t)]$. Вірогідність другої події рівна (ξ може приймати будь-які значення від 0 до t , тому застосуємо формулу повної вірогідності [31, 326])

$$\int_0^t [1 - G(t - \xi)] \cdot [1 - F(t + x - \xi)] dH(\xi).$$

Розглянуті події несумісні, отже

$$p(x, t) = [1 - G(t)] \cdot [1 - F(t + x)] + \int_0^t [1 - G(t - \xi)] \cdot [1 - F(t + x - \xi)] dH(\xi). \quad (2.16)$$

Переходячи до межі при $t \rightarrow \infty$, скориставшись результатами [29], одержуємо

$$p(x) = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} [1 - Gt] \cdot [1 - F(t + x)] dt, \quad (2.17)$$

де μ – математичне очікування інтервалу між замінами елементу (або після відмови, або після виробленого розрахункового ресурсу).

Визначимо μ по формулі повного математичного очікування [3]:

$$\mu = \int_0^{\infty} [1 - G(t)] \cdot [1 - F(t)] dt + C_1 \int_0^{\infty} F(t) dG(t) + C_2 \int_0^{\infty} G(t) dF(t) \quad (2.18)$$

Тут перший доданок є математичне очікування часу роботи елементу без відмов і замін, другий доданок характеризує частку часу (від величини C_1) на заміни елементів, що відмовили на фіксованій позиції, а останній доданок – частку часу (від величини C_2), що доводиться на попереджувальні заміни справного елементу.

Враховуючи вираз (2.18), запишемо (2.17) у вигляді

$$p(x) = \int_0^{\infty} [1 - G(t)] \cdot [1 - F(t + x)] dt /$$

$$\int_0^{\infty} [1 - G(t)] \cdot [1 - F(t)] dt + C_1 \int_0^{\infty} F(t) dG(t) + C_2 \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dG[t]$$

Інтегруючи по частинах [2], можна одержати для $p(G)$ вираз вигляду

$$p(G) = \int_0^{\infty} A(t) dG(t) / \int_0^{\infty} B(t) dG(t). \quad (2.19)$$

Останній вираз є дробово-лінійним функціоналом відносно $G(t)$.

Скориставшись тим, що максимум дробово-лінійного функціонала типу (2.19) необхідно шукати в класі функцій розподілу [3]:

$$G(t) = \begin{cases} 0 & \text{нпу } t \leq \tau, \\ 1 & \text{нпу } t > \tau. \end{cases} \quad (2.20)$$

одержуємо:

$$p(x, \tau) = \frac{\int_0^{\tau} [1 - F(t + x)] dt}{\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + C_2 + (C_1 - C_2)F(\tau)}. \quad (2.21)$$

Диференціюючи (2.21) по τ і прирівнюючи одержаний результат нулю, знаходимо необхідну умову екстремуму функції $p(x, \tau)$:

$$\frac{C_2}{C_1 - C_2} = \left[\frac{F(\tau + x) - I}{I - F(\tau)} F(\tau) + \lambda(\tau) \int_0^T [I - F(t)] dt \right] \frac{I - F(\tau)}{I - F(\tau + x)} + \frac{I}{C_1 - C_2} \left[\frac{I - F(\tau)}{I - F(\tau + x)} \int_0^\tau [I - F(t + x)] dt - \int_0^\tau [I - F(t)] dt \right], \quad (2.22)$$

рішення якого визначає поточне значення ресурсу елемента, після закінчення цього ресурсу елемент повинен піддатися профілактичному регулюванню (або заміненій) [59, 74].

Вводячи виконуваний стосовно експлуатації ОМПН допущення, вважаючи, що $x \ll \int_0^t [I - F(t)] dt$ і $C_2 f(\tau)x \ll I$, потрібний період для монотонно зростаючої функції відмов $\lambda(t)$, запишеться у вигляді [7]:

$$\frac{C_2}{C_1} = I - \frac{I}{e^{-\int_0^{\tau_0} \lambda(t) dt} + \lambda(\tau_0) \int_0^{\tau_0} e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt}.$$

Задаючись різними значеннями C_2 , а, отже, і відносини C_2/C_1 при фіксованому значенні $C_1 - C_2 = A$, визначаємо термін напрацювання τ_0 , виражений в умовних одиницях часу n .

При управлінні по середніх статистичних характеристиках передбачався рівноімовірним вибір реалізації після повернення процесу $S(t_n)$ в первинний початковий стан [60]. Момент виходу процесу за допуск визначався безпосередньо при моделюванні і був позначений через T_q , при цьому було введено позначення: $k^{(q)}$ – індикатор реалізації, відповідної q -му виходу процесу $S(t_n)$ за рівень L , $k^{(q)} = 1$ при $q = 1, 2, \dots$

На підставі одержаних даних для кожного τ_0 були знайдені: середній час до першої відмови $T^{(2)} = \sum_q T_q / N$; середні витрати на одну відмову $Q^{(2)} = (C^{(2)} + A^{(2)}) / N$; середні витрати на одиницю часу (крок) $\hat{Q}^{(2)} = (C^{(2)} + A^{(2)}) / \sum_n T_q$; коефіцієнт готовності (вірогідність в довільний момент застати систему в робочому стані) $p_r^{(2)} = \bar{T}^{(2)} / (\bar{T}^{(2)} + \alpha^{(2)})$ [60].

При управлінні ризиком очікуваних втрат, як і у попередньому випадку, по таблиці випадкових чисел вибирався номер реалізації, для якої на кожному кроці перевірялася нерівність (6) [5], що приймає в даному випадку вигляд

$$e^{-\gamma(L-S(t_{n-1}))} \geq \frac{C_2}{(C_1 - C_2)(n-1)},$$

де $\gamma = 1$.

При першому виконанні даної стохастичної нерівності визначався крок, відповідний моменту ремонту (регулювання) – $(n^* - 1)$. Вказана процедура повторювалася для наступної реалізації і так до тих пір, поки процес $S(t_n)$ (в межах даної реалізації) не виходив за рівень L . Ця подія фіксувалася як відмова і підраховувалися кількість проглянутих реалізацій і накопичений по всіх реалізаціях час до відмови T_q .

Значення C_2 і $C_1 - C_2$ були ті ж, що і при управлінні на підставі знання моменту виходу процесу $S(t_n)$ за рівень L . Далі для всіх відмов, що мали місце, серед даного числа реалізацій підраховувався загальний сумарний час $\sum_q T_q$. За одержаними даними для кожного відношення

$C_2 / (C_1 - C_2)$ були розраховані показники $\bar{T}^{(3)}$, $Q^{(3)}$, $\hat{Q}^{(3)}$. Одночасно була розрахована крива попереджувального допуску [4, 42], при якому має місце мінімальний ризик втрат, рівняння якої має вигляд

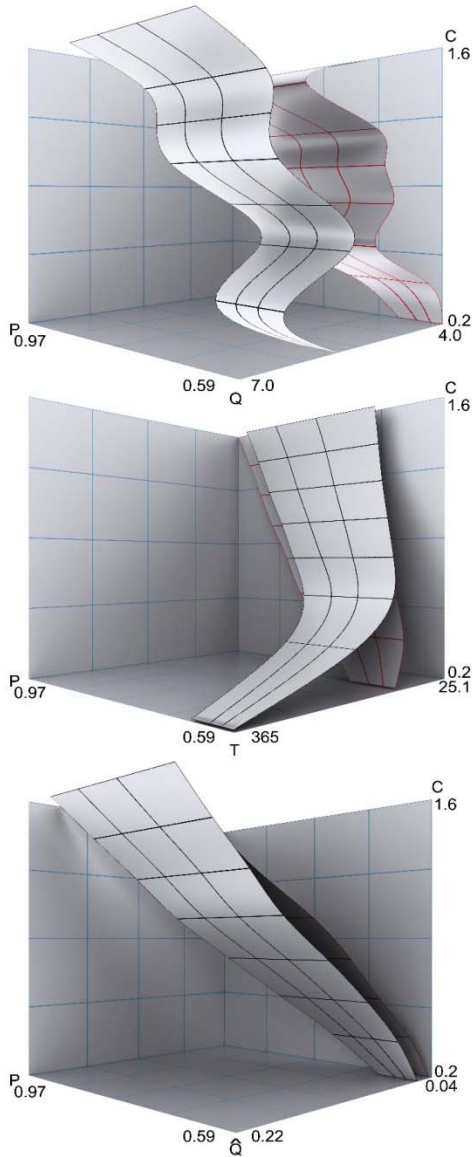


Рис. 2.17. Порівняльний аналіз стратегії попереджувального контролю та без такого

$$L_n = L - F^{-1} \left(1 - \frac{C_2}{(C_1 - C_2)n} \right).$$

На рис. 2.17 приведені залежності середнього часу до першої відмови T , середніх питомих витрат Q по напрацюванню системи, середніх витрат \hat{Q} на одну відмову і коефіцієнта готовності p від витрат C на технічне обслуговування локомотива. Аналізуючи ці графіки можна зробити такі висновки. Коефіцієнт готовності p , розрахований для фіксованих значень $C_1 - C_2$ більший для другого випадку, і зменшується із збільшенням C_2 . Тобто, для елементів, що належать до групи значного ризику, управління по мінімальному ризику дає істотний вигравш в надійності (коефіцієнту готовності, середньому часі до першої відмови) і витратах на одиницю часу в порівнянні з управлінням по середньовибіркових характеристиках процесу $S(t_n)$.

Обрана стратегія потенційно може заощадити мільйони гривень у народному господарстві України.

2.3. Формування процедури контролю при експлуатації ОМПН

Реалізація стратегії ризику обов'язково вимагає безперервного або дискретного контролю і аналізу технічного стану вузлів і деталей металоконструкції з вибором контролюємих параметрів, несучих достатню інформацію про стан системи у будь-який момент часу.

Дійсні значення координат вектора параметрів X можна отримати за допомогою прямих і непрямих вимірювань. При прямих вимірюваннях координат X число вимірювань відповідає розмірності вектора X (число вимірювань відповідає числу невідомих, $i = \overline{1, m}$). При непрямих вимірюваннях, коли значення x_i , $i = \overline{1, m}$ обчислюються за наслідками вимірювання вихідних реакцій, ці вихідні реакції повинні задовольняти двом основним вимогам: реакції X повинні забезпечувати однозначне визначення координат вектора технічного стану; число вимірюваних вихідних реакцій при цьому повинне бути мінімальним.

Під однозначним визначенням координат X розуміється взаємно однозначне відображення простору $\{K\}$ в простір вимірювання значень X . Природньо, при цьому число вимірюваних реакцій повинне бути мінімально можливим, щоб не було дублювання вимірювань.

Існують два види вимірювань X :

- статичні, коли в системі закінчено перехідні процеси, викликані вхідними діями U^* , і вона функціонує в стаціонарному режимі роботи;
- динамічні, коли система функціонує в перехідному режимі від моменту часу $t = t_0$ надходження U^* до настання стаціонарного режиму.

При статичних вимірюваннях характеристики X не залежать від часу й, отже, для однозначного визначення K необхідно вимірювати n характеристик X . Число вимірюваних вихідних реакцій можна зменшити за рахунок вимірювання різних характеристик в одній вихідній реакції (наприклад, для вихідної реакції вигляду $A \sin(\omega t + \varphi_0)$ такими характеристиками є амплітуда, частота, фаза), а також за рахунок послідовного вимірювання в часі значень окремих компонентів X , їх сукупностей і комбінацій.

При динамічних вимірюваннях оцінюються характеристики X , які залежать не тільки від K , але й від часу. Щоб мінімізувати число вимірюваних вихідних реакцій, треба вибрати такі реакції, в яких зміряні значення X в різні моменти часу перехідного режиму забезпечували б однозначне визначення K .

Задача управління технічним станом в просторі $\{X\}$ не викликає принципових ускладнень. Оскільки координати вектора технічного стану X є незалежними, то, якщо $X \in Q_x$, система визнається працездатною.

Для обґрунтування даної процедури при експлуатації ОМПН необхідні:

- математична модель функціонування конкретної технічної системи (об'єкту контролю), яка кількісно описує зв'язки між вхідними діями і рішеннями щодо них;
- показники якості функціонування об'єкту експлуатації (контролю), що дозволяють судити про доцільність його застосування за призначенням.

Математична модель функціонування об'єкту в загальному випадку має вигляд [1]:

$$F\{X, K, U, t\} = 0, \quad (2.28)$$

де $X = [x(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]$ – вектор-функція вихідної реакції;
 $K = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ – вектор параметрів математичної моделі;
 $U = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_i(t)]$ – вектор-функція вхідних дій.

Математична модель (2.28) вважається відомою, якщо визначені вид моделі і чисельні значення її параметрів.

Показник якості функціонування об'єкту представляється векторним функціоналом $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p]$, де компоненти $\Phi_i, i = 1, \dots, p$ – технічні характеристики системи, визначаючи її здатність виконувати встановлений перелік задач при практичному застосуванні [11, 63].

Показник Φ задається на безлічі вхідних дій і вихідних реакцій у вигляді [63]:

$$\Phi = \phi\{X, U\}.$$

Доцільність використання об'єкта експлуатації за призначенням визначається на основі порівняння поточного значення показника Φ з деякими граничними значеннями, які виділяють подібність Q_ϕ . Якщо $\Phi \in Q_\phi$, то вважають, що об'єкт застосовувати доцільно.

Вибір параметрів для контролю обумовлений вимогами однозначного визначення положень вектора технічного стану у вибраному просторі. Тому подальший виклад проведемо, як було сказано, з урахуванням еволюційних закономірностей протікаючих процесів, що логічно переводить наші дослідження на наступний рівень інформаційно-логічної схеми – детальний.

Висновки до розділу 2

1. Управління технічною експлуатацією ОМПН в рамках концепції ризику має двояке уявлення. З теоретичної точки зору – це дослідження задач розробки і застосування математичних моделей альтернатив формування обґрунтованих дій по попередженню неприпустимої зміни технічного стану вузлів і агрегатів локомотива і призначення показників контролю, а, так само, статистичної оцінки відповідності нор-

мованих і фактичних значень контрольованих параметрів працездатності. З практичної точки зору – це формування інформаційного відображення процесів деградації, що відбуваються, забезпечуючого взаємозв'язок вхідної інформації обумовлюючих процесів і дозволяючого збудувати стратегію технічної експлуатації ОМПН, адекватну їх можливим технічним станам.

2. Проведено огляд методів технічної експлуатації і ремонту ОМПН. Визначено і систематизовано основні принципи управління технічним станом в процесі експлуатації. Обґрунтовано постановку задачі підвищення коефіцієнта готовності системи на основі вироблення коректуючих дій, орієнтованих на ризики.

3. В процесі експлуатації ОМПН унаслідок їх обмеженої безвідмовності доцільність проведення ремонтних дій залежить від їх технічного стану. Задача визначення виду технічного стану – є задача контролю, вона не є ізольованою від процесу експлуатації в цілому, оскільки повинна розв'язуватися з урахуванням можливості і доцільності проведення ремонтних робіт.

Формування будь-якої стратегії технічної експлуатації ОМПН ґрунтується на використанні наступної інформації, що характеризує технічний стан обладнання ОМПН:

- апостеріорної інформації про зміну величини контрольованих параметрів за попередній період експлуатації;
- інформації про вид домінуючого чинника, що виявляється через наслідки накопичуваних відмов для кожного вузла металоконструкції;
- інформації про витрати на відновлення працездатності і управляючі дії.

4. Формалізовано в математичних термінах задачу визначення раціональної стратегії забезпечення показників безпеки в залежності від зміни параметрів за критерієм ризику очікуваних втрат, визначено область математики, до якої ця задача відноситься, і знайдено підхід до її рішення.

Доведено, що ця задача є задачею статистичного рішення щодо підвищення коефіцієнта готовності системи на основі вироблення коректуючих заходів, орієнтованих на ризики. Показано, що оптимальним для її вирішення є байєсівський підхід. На його основі обґрунтовано методикою визначення оптимального по критерію ризику очікуваних втрат правила ухвалення рішення і обґрунтовано стратегію прогноуючого контролю в умовах управління ризиками, яка полягає у фіксації меж прийнятного ризику з подальшим виконанням в рамках заданих можливостей пошуку раціонального варіанту.

5. Встановлено, що при управлінні технічною експлуатацією ОМПН з орієнтації на ризики при обліку як поступових, так і раптових поломок, можлива побудова ремонтного циклу із збільшенням середнього часу до першої відмови в порівнянні з ремонтним циклом, заснованим на середньовибіркових характеристиках функцій розподілу випадкових величин напрацювання обладнання ОМПН. Залежно від співвідношень витрат на проведення попереджуючих дій (профілактичне обслуговування) і витрат на регулювання параметрів в аварійному режимі, управління ризиком дає вигравш в надійності (коефіцієнті готовності) і середніх витратах на одиницю напрацювання обладнання.

Перелік посилань до розділу 2

1. Балдин К.В. Управленческие решения: теория и технология принятия / Балдин К.В., Воробьев С.Н. — М.: Проект, 2004. — 304 с.
2. Барзилович Е.Ю. К проблеме обслуживания сложных технических систем / Барзилович Е.Ю. // Известия АН СССР: Техническая кибернетика, 1966. - №6.
3. Барзилович Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. - М.: Советское радио, 1971. - 373 с.
4. Барзилович Е.Ю. Организация профилактики технических комплексов с учетом ограничений на средства обслуживания / Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. // Надежность и массовое обслуживание. - М.: Наука, 1969.
5. Барзилович Е.Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию / Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. - М.: Транспорт, 1981. — 197 с.
6. Блинов Э.К. Техническое обслуживание и ремонт судов по состоянию / Блинов Э.К., Розенберг Г.Ш. - СПб.: Судостроение, 1992. — 183 с.
7. Брейман Л. Задачи о правилах остановки / Брейман Л. // Прикладная комбинаторная математика. - М.: Мир, 1968. - С. 159-202.
8. Буїв В.В. Методика формування і уточнення програми розробки технічних регламентів / Буїв В.В., Белов А.З., Грот В.В., Мітін З.В., Шестоперов О.М. — М.: НИСИПП, 2005.
9. Быков А.А. Нормативно-экономические модели управления риском / Быков А.А., Акимов В.А. // Проблемы анализа риска, 2004. — Т. 1. - [Издание Российского научного общества анализа риска].
10. Быков А.А. Об анализе риска, концепциях и классификации рисков / Быков А.А., Порфильев Б.Н. // Проблемы анализа риска, 2006. - Т. 3. - № 4. - С. 319-336.
11. Владимиров В.А. Оценка риска и управление техногенной безопасностью / Владимиров В.А., Измалков В.И., Измалков А.В. — М.: Деловой экспресс, 2002.

12. Владимиров В. А. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика / Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. и др. – М.: Наука, 2000. - 431 с.
13. Гаврилов В.С. Управление технической эксплуатацией морского флота / Гаврилов В.С., Гальперин М.М. - М.: Транспорт, 1988. -300 с.
14. Гальперин М.М. Система технического обслуживания и ремонта морских судов / Гальперин М.М. - М.: Транспорт, 1981. - 302 с.
15. Герман А. С. Антиглобалистский манифест / [Герман А. С.] Под ред. Л. А. Шелепина // Академия Тринитаризма. - М., Эл № 776567, публ. 13857, 06.10.2006 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0230/002a/02301006.htm>.
16. Горский А.В. Принципы построения оптимальной системы ремонта / Горский А.В., Козырев В. А. // Электроподвижной состав. Эксплуатация. Надежность. Ремонт. - М.: Транспорт, 1983. - С.239-252.
17. ГОСТ Р 51901-2002 «Аналіз ризику технологічних систем», 2003.
18. Дабагян А.В. Оптимизация технических систем транспорта. На примере гражданской авиации / Дабагян А.В., Пинаев Е.Г., Голоскоков А.Е., и др. -М.: Транспорт, 1990. – 285 с.
19. Данько М.І. Методологічний аспект формування критеріїв ефективного управління залізничною транспортною системою / Данько М.І., Бутько Т.В., Ломотько Д.В., Козак В.В. //Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2010. – Вип. 113. - С. 5-5.
20. Дуб Дж. Вероятностные процессы / Дуб Дж. - М., 1956.
21. Дынкин Е.Б. Оптимальный выбор момента остановки марковского процесса / Бынкин Е.Б. – М.: ДАН СССР, 1963. - 150, 2. - С. 238-240.
22. Дынкин Е.Б. Теоремы и задачи о процессах Маркова / Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А. - М.: Наука, 1967.
23. Елагин Ю.П. Понятие «Безопасность» / Елагин Ю.П. // Атомная энергия, 1996. - Т.80. - Вып. 6. - С. 415-420.
24. Заславский Г. М. Стохастичность динамических систем / Г. Заславский. - М.: Наука, 1984. - С. 270.
25. Капица С.П. Синергетика и прогноз будущего / Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. — М.: Едиториал УРСС, 2003.
26. Кини Р.Л., Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Кини, Х. Райфа. - М.: Радио и связь, 1981. - 560 с.
27. Князева Е. Н. Сложные системы и нелинейная динамика в природе и обществе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.synergetic.ru/society/index.php?article=kn3>.
28. Ковалев Е.Е. Концепция приемлемого риска / Ковалев Е.Е. // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 1993. - Вып. 6. - С. 3-20.
29. Кокс Д. Теория восстановления / Кокс Д., Смит В. - М.: Мир, 1967.
30. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза / Колесников А.А. — М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
31. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей / Колмогоров А.Н. - М.: Наука, 1974.

32. Кузнецов Е.С. Управление технической эксплуатацией автомобилей / Кузнецов Е.С. - М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
33. Кузьмин И.И. Принципы управления риском / Кузьмин И.И. // «Проблемы анализа риска», 2005. - Т. 2. - № 1. - С. 73-93.
34. Курдюмов С. П. Синергетика и системный синтез / Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. // Новое в синергетике: взгляд в третье тысячелетие. — М.: Наука, 2002.
35. Лихтенберг А. Регулярная и стохастическая динамика / Лихтенберг А., Либман М. - М.: Мир, 1984. - С. 528.
36. Малинецкий Г.Г. Наука о риске и жизни / Малинецкий Г.Г. // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. - М.: 2001. - Вып. 3. - С. 59-71.
37. Малинецкий Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. - М.: Едиториал УРСС, 2002.
38. Малинецкий Г. Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии / Малинецкий Г. Г. // Информационные технологии и вычислительные системы, 2002. - № 4. - С. 83–108.
39. Малинецкий Г.Г. Теория риска и безопасности с точки зрения нелинейной динамики и системного анализа / Малинецкий Г.Г. // Глобальные проблемы как источник чрезвычайных ситуаций. – М.: УРСС, 1998. С. 216-241.
40. Малинецкий Г.Г. Экспериментальный стенд Комплексной системы научного мониторинга. Структура и функции / Малинецкий Г.Г., Митин Н.А., Шишов В.В. и др. - М.: Ин-т прикл. мат. им. Келдыша, 2007. – 28 с.
41. Методика оценки возможного экономического и экологического ущерба от реализации внутренних и внешних угроз на АЭС концерна "Росэнергоатом". - М.: 2004.
42. Методы решения задач математического программирования и оптимального управления / Под ред. Меренкова А.П. - Новосибирск: Наука, 1984. - 233 с.
43. Міжнародний стандарт ІЕС 60300-3-5:1995 «Аналіз ступеня ризику технологічних систем».
44. Міжнародний стандарт ISO 14121:1999 «Безпека устаткування - принципи оцінки ризику».
45. Могилевский В.Д. Методология систем / Могилевский В.Д. — М.: Экономика, 1999.
46. Набойченко И.О. Многоуровневая система безопасности / Набойченко И.О., Шабалин Н.Г. // Железнодорожный транспорт, 2003. - № 5. - С. 76-79.
47. Надёжность и эффективность в технике: справочник / В.И.Кузнецов, Е.Ю.Барзилович и др. - М.: Машиностроение, 1990. - Т1: Эксплуатация и ремонт. – 1990 – 320 с.
48. Надёжность и эффективность в технике: справочник / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко и др. - М.: Машиностроение, 1987. - Т9: Техническая шагностика. – 1987. – 339 с.
49. Найденов В.С. Нормативные основы организации труда / Найденов В.С., Зейфман М.М. - Киев: Технжа, 1987. - 127 с.
50. Научная организация труда в промышленности: Учеб.- нагляд. пособие. - М: Экономика, 1980. - 230 с.

51. Научная организация труда в управлении производственным коллективом: Общеотраслевые науч.-метод. рекомендации / Г.Э. Слезингер, Т.А. Колева, О.М. Богданова и др. - М.: Экономика, 1987. - 317 с.
52. Научная организация эксплуатационной работы железной дороги / Годович Л.М., Левантович Ю.И., Начученко С.Ф. и др. - М.: Транспорт, 1976. - 207 с.
53. Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие / Под ред. Г. Г. Малинецкого, С. П. Курдюмова. // Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения. - М: Наука, 2002. - 480 с.
54. Острейковский В. А. Теория надежности / Острейковский В. А. — М.: Высшая школа, 2003.
55. Отказы электротехнических устройств (ФРГ) // Железные дороги мира, 1996. - № 5. - С. 40-42.
56. Павлов Л.Н. Использование и оптимизация показателя стоимости жизненного цикла изделия / Л. Павлов // Железнодорожный транспорт. – 2007. - №7. – С. 74-77.
57. Петухов Р.М. Методика экономической оценки износа и сроков службы машин / Р. Петухов - М.: Экономика, 1965. - 167 с.
58. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу // Наказ Укрзалізниці № 093-ЦЗ від 30.06.2010 р.
59. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л.С. и др. - М.: Физматгиз, 1961. - 218 с.
60. Практическая реализация методологии ALARA на АЭС: Методическое пособие. - М., 2010.
61. Прангишвили И.В. Системные закономерности и системная оптимизация / Прангишвили И.В., Бурков В.Н. и др. - М.: СИНТЕГ, 2004. - 208 с.
62. Проблема эффективности в современной науке / Под ред. А.Д.Урсула. - Кишинев, 1985. - 256 с.
63. Прудовский Б.Д. Управление технической эксплуатацией автомобилей по нормативным показателям / Прудовский Б.Д., Ухарский В.Б. - М.: Транспорт, 1990. – 239 с.
64. Пузир В.Г. Вдосконалення системи експлуатації локомотивів на підставі інформації про їх фактичний стан / В. Пузир // Міжвуз. зб. наук. праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – Вип.46. – С.46-49.
65. Рац В.М. Концепция обеспечения безопасности / Рац В.М., Слепцов Б.Г., Копылов Г.Г. - М.: «Касталь», 1995.
66. Решетов Д.Н. Надёжность машин / Решетов Д.Н., Иванов А.С. - М.: Высшая школа, 1988. – 235 с.
67. Ридель Э.Э. Определение рационального периода между плановыми ремонтами при постепенных отказах простого объекта / Э.Ридель // Сб. научн. тр. ВЗИИТ, М.: ВЗИИТ, 1977. - Вып. 92. - С.58-73.
68. Роббинс Г. Теория оптимальных правил остановки / Роббинс Г., Сигмунд Д., Чао И. - М.: Наука, 1977. - 188 с.
69. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов / Савчук В.П. - М.: Наука, 1989.

70. Селиванов Л. И. Основы теории старения машин / Л. Селиванов - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1971. - 408 с.
71. Смирнов Н.Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. - М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
72. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта на базе интеллектуальных технологий. – М.: ВНИИЖТ, 2002. - 30 с.
73. Стрекопытов В.В. Определение периодичности и объемов ремонта машин на основании данных о надежности их узлов / Стрекопытов В.В., Пойлов Л.К. // Сб.научн. тр. УЛИИЖТ. - Л.: УЛИИЖТ, 1970. - Вып. 306. - С.93-95.
74. Теория прогнозирования и принятия решений / Под ред. Саркисяна С.А. - М.: Высшая школа, 1977. - 349 с.
75. Технический прогресс в транспортном машиностроении (ФРГ) // Железные дороги мира, 1996. - № 5. - С. 32-36.
76. Управление риском / В. А. Владимиров, В. В. Кульба, Г. Г. Малинецкий и др. — М.: Наука, 2000.
77. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах / Хан Г., Шапиро С. [пер. с англ. Е. Г. Коваленко]; под ред. В. В. Налимова. - М.: Мир, 1969. - 396 с.
78. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж.Хенли, Х. Кумамото. - М.: Машиностроение, 1984.
79. Ширяев А.Н. О марковских достаточных статистиках в неаддитивных байесовских задачах последовательного анализа / Ширяев А.Н. // Теория вероятности и ее применение, 1964. - № 10. - С.993-1010.
80. Ширяев А.Н. Статистический последовательный анализ / Ширяев А.Н. - М.: Наука, 1976.
81. Шишкин В. М. Мета модель анализа, оценки и управления безопасностью информационных систем / Шишкин В. М.; под ред. Д. С. Черешкина // Проблемы управления информационной безопасностью: Сборник трудов ИСА РАН. - М.: Едиториал УРСС, 2002. - С. 92–105.
82. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение / Шустер Г. - М.: Мир, 1988. - С. 240.

ОБУМОВЛЕНІСТЬ ДИНАМІЧНИХ НЕСТАБІЛЬНОСТЕЙ ПРОСТОРОВИХ І ЧАСОВИХ ЕФЕКТІВ РИЗИКУ

3.1. Визначення головного системоутворюючого чинника

Даний підрозділ присвячено розбудові уявлень щодо розвитку руйнування, як процесу, викликаному деградацією матеріалу внаслідок широкого кола явищ, в результаті яких матеріал вичерпує адаптаційні можливості протистояти накопиченню пошкоджень, що обумовлено необоротною перебудовою її структури.

Пошук закономірностей руйнування зосереджено на універсальних нелінійних механізмах еволюції динамічних систем [2]. Слід зазначити той факт, що універсальність внутрішніх механізмів обумовлює схожість і зовнішніх проявів процесів [31]. Тому відповідно до інформаційно-логічної схеми досліджень, що задає ієрархію методологічних рівнів дослідження, сформовано структурно-функціональний базис, виходячи з узгодженості процесів, які досліджуються на різних рівнях декомпозиції проблеми.

Суть інформаційно-логічної схеми полягає у тому, що досліджувана система розглядається не як сукупність елементів і їх відносин, а як сукупність властивостей елементів. При цьому адекватність одержуваних висновків і рекомендацій визначатиметься правильністю відображення загальних закономірностей процесу дослідження в окремі закономірності, властиві процесам, досліджуваним на рівні функціонально-структурного аналізу якості системи (рівень k^6 III).

В рамках феноменологічного підходу, заснованого на використанні схеми гомеостазиса, в пункті 3.1.1 представлено інформаційну модель накопичення пошкодженості в системі, основу на концептуальній ідеї існування матерії і енергії у вигляді похідного продукту, що виникає в процесі передачі і накопичення речовини, енергії і інформації у відкритих диссипативних системах.

Переходячи від феноменологічної моделі до фізичних уявлень, схема гомеостазиса представляється далі моделлю «хижак - жертва», відповідно до якої в пункті 3.1.2. запропоновано модель періодичних структурних перетворень в рамках дислокаційно - дифузійної кінетики, що відображає колективні ефекти при структурних перетвореннях у напруженому матеріалі у згоді з експериментальними даними.

3.1.1. Формалізація процесу пошкодженості схемою гомеостазиса

Згідно принципу гомеостазиса, диссипативні системи є парними утвореннями: якщо формується система $X(t)$, то разом з нею формується і її сателіт - система $Y(X(t))$ [30].

Для $Y(X(t))$ система $X(t)$ постачає енергію і визначає просторові межі розвитку і час існування. Динаміка системи, як бінарної структури, здійснюється, з одного боку, за рахунок надходження речовини і енергії з середовища, а, з іншого, - внаслідок обміну ними між складовими її підсистемами.

Складові підсистеми X і Y знаходяться у функціональній залежності від вихідних характеристик. Система Y завжди прагне по своїй величині до X , і, по суті, її величина виступає як зворотній негативний зв'язок, що уповільнює і стабілізує зростання речовини, енергії і інформації (PEI) в системі $X \leftrightarrow Y$.

У диференціальній формі дана закономірність записується в наступному вигляді [30]:

$$\frac{dM}{dt} = Q(M, V, t) - q(M, t), \quad (3.1)$$

де M – вихідні характеристики системи; Q - витрата PEI, що йде на формування сателіта Y ; V - місткість середовища; q – витрата PEI у потоку, створюваному системою Y ; t - час.

Доданок $Q(M, V, t)$ характеризує процес накопичення PEI в системі X , асимптотично затухаючого у міру заповнення місткості V . Доданок $q(M, t)$ характеризує процес накопичення BEI сателітом Y , який теж відбувається з уповільненням у міру заповнення місткості, але створюваної системою X . Таким чином, сателіт Y інгібує розвиток системи X , і виступає як зворотній негативний зв'язок. А взаємодія

складових елементів (підсистем) $X(t)$, $Y(t)$ направлена до встановлення балансу витрат РЕІ, що відповідає на фазовій площині аттрактору. Всі фазові траєкторії, розташовані на аттракторі, характеризують об'єктивну спрямованість до дисипації РЕІ, відповідно до другого началу термодинаміки. Завдяки цьому, система переходить в режим сталого автоколивання [30], що не виходить по амплітуді за межі, обумовлені процесами, які відбуваються в системі. Моделюватимемо процес співвідношення процесів в бінарній системі, одна складова якої відповідає «хижаку» – підсистемі з об'ємом, який заповнюється, за рахунок вичерпання іншої її складової – «жертви».

Співвіднесемо цей алгоритм з гомеостазисом. Феноменологічна модель взаємодії відповідних потоків в системі є системою трьох диференціальних рівнянь з сімома параметрами [30]:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \mu u - \nu u^2 - \beta uv, \\ \frac{dv}{dt} &= h\nu w - \alpha v, \\ \frac{dw}{dt} &= \delta\beta uv - \gamma w. \end{aligned} \quad (3.2)$$

У якості змінних узяті щільність конкуруючих потоків накачування і розсіювання РЕІ (u, v, w); t - час.

Перехід до безрозмірних змінних $x = \nu\mu^{-1}u, y = \beta\mu^{-1}v, z = w, \tau = \mu t$
 $x = \nu\mu^{-1}u, y = \beta\mu^{-1}v, z = w, \tau = \mu t$ приводить до системи

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= x(1 - x - y) \equiv P(x, y, z), \\ \frac{dy}{d\tau} &= ay(z - 1) \equiv Q(x, y, z), \\ \frac{dz}{d\tau} &= b(xy - cz) \equiv R(x, y, z) \end{aligned} \quad (3.3)$$

з трьома позитивними параметрами
 $a = \alpha\mu^{-1}, b = h\delta\mu(\alpha\nu)^{-1}, c = \alpha\gamma\nu(\delta h)^{-1}\mu^{-2}$.

З фізичного значення змінних виходить, що всі вони позитивні, отже, фазовий простір даної системи – перший октант простору (x, y, z) .

Система (3.3) має наступні стани рівноваги:

1) $O(0,0,0)$ - сідло із стійкою сепаратрисною поверхнею, яка співпадає з площиною $x = 0$.

2) $A(1,0,0)$ - стійкий вузол.

Координати решти станів рівноваги визначаються із системи рівнянь:

$$\begin{aligned} 1 - x - y &= 0, \\ z - 1 &= 0, \\ xy - cz &= 0. \end{aligned} \tag{3.4}$$

Для встановлення числа і характеру цих станів рівноваги побудуємо на площині (x, c) чотири основні криві: криву станів рівноваги і криві $r = 0, q = 0, pq - r = 0$.

З перших двох рівнянь (3.4) виходить, що $y = 1 - x, z = 1$. Підставивши ці вирази в третє з рівнянь (3.4), одержимо рівняння кривої станів рівноваги:

$$c = x - x^2. \tag{3.5}$$

Ця крива – парабола з вершиною у точці $(1/2; 1/4)$, перетинаюча вісь x при $x = 0$ і $x = 1$ (рис.3.1). Розглядаючи перетин прямої $c = \text{const}$ з кривою (3.5), приходимо до висновку, що при $c < 1/4$ є два стани рівноваги. При $c = 1/4$ ці стани рівноваги зливаються, а при $c > 1/4$ зникають.

Для цих двох станів рівноваги параметри p, q і r визначаються виразом $p = x + bc, q = bc(x - a), r = abc(1 - 2x)$. Рівняння кривої $pq - r = 0$ має вигляд

$$c = \frac{a - ax - x^2}{b(x - a)} \quad (3.6)$$

Ця крива має вертикальну асимптоту $x = a$, і її графік може мати різний якісний характер, залежно від значення параметра a .

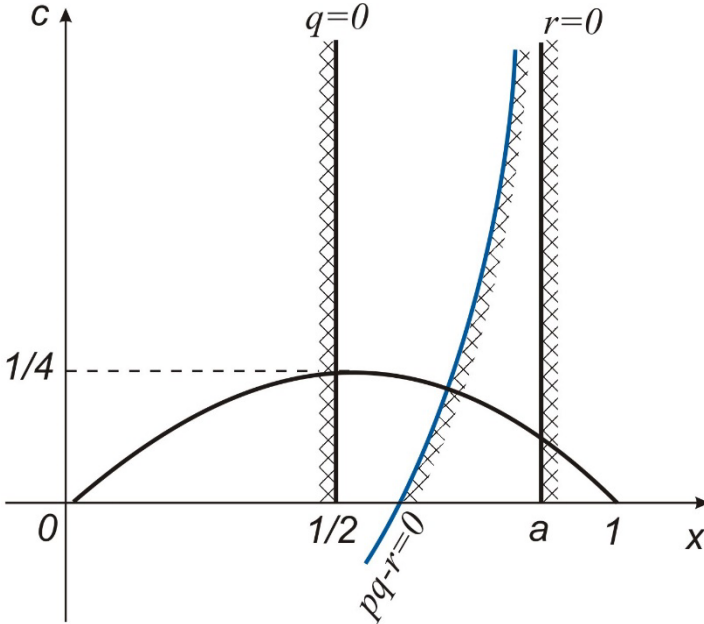


Рис. 3.1. Крива станів рівноваги (випадок 1)

При $a < 1/2$ $c(x)$ - збуваюча функція; гілка кривої (3.6), перетинаюча вісь x при $x > 0$, має в цьому випадку точку перетину з параболою (3.5) $\alpha < x < 1/2$, тобто зліва від її вершини.

При $a > 1/2$ крива (3.6) має мінімум при $x < a$ і максимум при $x > a$, причому обидва ці екстремуми розташовані в області $c < 0$; в цьому випадку вона перетинає вісь при $1/2 < x < a$, і, отже, перетин кривих (3.5) і (3.6) відбувається праворуч від вершини параболи (3.5).

На рис. 1 зображено взаємне розташування на площині x, c кривої станів рівноваги і кривої $r = 0, q = 0$ і $pq - r = 0$ для $a < 1 < 2$ (ви-

падок 1). Штрихування на кривих $r = 0, q = 0, pq - r = 0$ показує, по яку сторону від цих кривих розташовані області, де відповідно $r > 0, q > 0, pq - r > 0$.

Позначить через x_0 абсцису точки перетину кривої станів рівноваги з кривою $pq - r = 0$. При $0 < x < a$ $r > 0, q < 0$; при $a < x < x_0$ $r > 0, q > 0, pq - r < 0$. Отже, при $0 < x < x_0$ М - сідло або сідло-фокус з нестійкою сепаратрисною поверхнею.

При $x_0 < x < 1/2$ $r > 0, q > 0, pq - r > 0$. В цьому випадку М - стійкий вузол або фокус.

При $1/2 < x < 1$ $r < 0, q > 0, pq - r > 0$. Значить, N - сідло або сідло-фокус із стійкою сепаратрисною поверхнею.

При $x = 1/2$, тобто у вершині параболи (3.5), відбувається злиття М і N. При цьому $r = 0$, і один з коренів характеристичного рівняння $\lambda_1 = 0$. Два інші кореня визначаються з рівняння

$$\lambda^2 + (1/2 + bc)\lambda + bc(1/2 - a) = 0. \quad (3.7)$$

Дискримінант цього рівняння $D = (1/2 - bc)^2 + 4abc > 0$, значить корені дійсні. Оскільки $1/2 + bc > 0$ і, то обидва кореня негативні. Беручи до уваги той факт, що досліджуваний складний стан рівноваги парно-кратний, оскільки розпадається на два простих: М і N, визначаємо, що він є сідло-вузлом із стійкою вузловою областю [30].

Поблизу вершини параболи (3.5), тобто при С, трохи менше 1/4, М буде стійким вузлом, а N - сідлом. При подальшому зменшенні С вузол М десь на кривій станів рівноваги до її перетину з кривою $pq - r = 0$ повинен перетворитися на фокус, оскільки в точці, де $pq - r = 0$, цей стан рівноваги є складним фокусом або центром.

Для з'ясування його характеру була обчислена перша ляпуновська величина, яка виявилася негативною. Це означає, що під час переходу через межу $pq - r = 0$ стійкий фокус стає складним стійким фокусом, з якого народжується єдиний стійкий граничний цикл; складний фокус при цьому перетворюється на сідло-фокус з нестійкою сепаратрисною поверхнею [25].

Таким чином, система (3.3) в певній області значень параметрів описує періодичні зміни параметрів x, y, z .

На рис. 3.2 зображене взаємне розташування на площині x, c чотирьох основних кривих: кривої станів рівноваги, $r = 0, q = 0, pq - r = 0$ для $1/2 < a < 1$ (випадок 2).

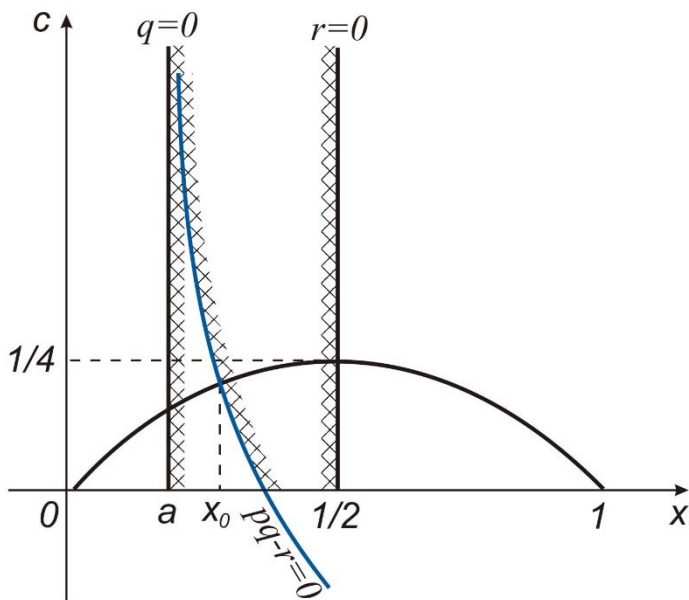


Рис. 3.2. Крива станів рівноваги (випадок 2)

При $0 < x < 1/2$ $r > 0, q < 0$, тоді M – сідло або сідло-фокус з нестійкою сепаратрисною поверхнею.

При $1/2 < x < 1$ $1/2 < x < 1$, тоді N – сідло або сідло-фокус із стійкою сепаратрисною поверхнею (оскільки при $1/2 < x < a$ $r < 0, q < 0$, а при $a < x < 1$ $r < 0, q > 0, pq - r > 0$).

У вершині параболи (3.5) M і N зливаються, утворюючи складний стан рівноваги, для якого один з коренів характеристичного рівняння $\lambda_1 = 0$, а два інших визначаються з рівняння (3.7). Оскільки в даному випадку $bc(1/2 - a) < 0$, то корені λ_2 і λ_3 дійсні і різних знаків.

Оскільки даний складний стан рівноваги парно-кратний, то, як впливає з [25], він є станом рівноваги типу C (сідло-сідло).

При $a > 1$ (випадок 3) розташування основних кривих відрізняється від показаного на рис. 3.2 тільки тим, що точка перетину кривої станів рівноваги і кривої $pq - r = 0$ лежить нижче осі абсцис. При цьому M і N мають той же якісний характер, що і у випадку 2. Тому випадки 2 і 3 аналогічні.

Покажемо, що дана система (3.3) не має в I октанті замкнутих інтегральних поверхонь.

Достатньою умовою того, що в деякій області система (3.3) не має замкнутих інтегральних поверхонь, є існування функції, що безперервно диференціюється, для якої вираз $\sigma = (PF)'_x + (QF)'_y + (RF)'_z$ зберігає знак в цій області [25, 30].

Візьмемо для системи (3.3) $F(x, y, z) = 1/(xyz)$. Тоді $\sigma = -1/(yz) - b/z^2 < 0$. Беручи до уваги той факт, що $x = 0$ і $y = 0$ - інтегральні площини, а $z = 0$ - площина без контакту з траєкторіями, можна заключити, що система (3.3) не має в I октанті замкнутих інтегральних поверхонь.

У припущенні, що, окрім стійких станів рівноваги і стійкого граничного циклу, система (3.3) не має інших граничних множин, можливі наступні сценарії еволюції бінарної системи залежно від співвідношення параметрів і початкових умов: 1) повна адаптація системи до зовнішніх збурень; 2) періодичний характер розвитку; 3) колапс системи.

Хай початкові умови потрапляють в область тяжіння стійкого вузла N . Тоді можливі два результати: якщо початкові значення x, y, z невеликі, то це означає, що невеликі початкові пошкодження структури успішно ліквідуються системою; якщо початкові значення x, y, z великі, то сприятливий сценарій в цьому випадку можна розглядати тільки теоретично, оскільки система повинна зруйнуватися.

Якщо початкові умови потрапляють в область тяжіння стійкого вузла або фокусу M , або в область тяжіння граничного циклу, то це означає автоколивальний характер процесів – «співіснування» конкуруючих потоків [25].

3.1.2. Перехід від феноменологічної моделі до фізичних уявлень щодо зміни структури системи

Переходячи від феноменологічної моделі до фізичних уявлень, відповідні потоки РЕІ представимо співвідношенням інтенсивностей взаємного впливу дислокацій і вакансій [17] і інтенсивністю процесів розмноження і анігіляції дефектів.

Тоді п. 2) (пункт 3.1.1) стану системи може бути представлено ефектом періодичної зміни фізико-механічних властивостей при еволюції структури системи [42].

При теоретичному дослідженні вказаних особливостей представляються можливими два підходи. Перший ґрунтується на розгляді мікромеханізмів дислокаційно-вакансійної взаємодії, включаючи процеси генерації і розмноження вакансій і дислокацій, їх анігіляції і поглинання стоками, які визначаються особливостями мікроструктури, умовами деформації і т.д. Не дивлячись на наочність і передбачуваність такого підходу, він ґрунтується на конкретних механізмах, а це може привести до недооцінки найістотніших з них і зайвої деталізації неістотних. В результаті ускладнюється математична схема і можуть виникнути непереборні формальні труднощі. В рамках другого підходу, що має феноменологічний характер, використовується певний алгоритм, що дозволяє знайти структуру рівнянь руху для основних величин, що характеризують поведінку системи. Очевидні недоліки такого підходу витікають з недооцінки мікромеханізмів явища і полягають в труднощі відбору фізичних параметрів, що впливають на поведінку системи (параметрів мікроструктури матеріалу, умов деформації і т. д.).

Найпривабливішим представляється комплексний метод, коли основні рівняння виводяться феноменологічно, а потім кожен їх доданків представляється в рамках мікроскопічних уявлень. В результаті коефіцієнти феноменологічних рівнянь виражаються через параметри структури.

Феноменологічна модель еволюції системи, як динамічного нелінійного середовища в процесі його деградації, в наближенні схеми гомеостазиса (3.2) [30, 43], включає ансамблі взаємодіючих дислокацій і мікротріщин [17], кінетика яких описується системою зв'язаних диференціальних рівнянь, впливаючих з (3.2):

$$\frac{d\rho}{dt} = A\rho - B\rho^2 - C\rho m, \quad (3.8)$$

$$\frac{dm}{dt} = C_1\rho m - Dm, \quad (3.9)$$

де ρ — густина дислокацій, m — сумарна площа поверхні мікротріщин в одиниці об'єму, t — час, A, B, C, C_1, D — постійні коефіцієнти. У правій частині (3.8) перший член характеризує розмноження дислокацій під впливом механічного навантаження, другий описує анігіляцію дислокацій, а третій — поглинання дислокацій мікротріщинами і зменшення густини дислокацій, пов'язане з відшаровуванням мікрочастинок (що уносять з собою дислокації). У правій частині (3.9) перший член характеризує зростання мікротріщин за рахунок поглинання дислокацій, а другий — зменшення густини мікротріщин, пов'язане з відшаровуванням мікрочастинок (що уносять з собою тріщини).

У фізично цікавому діапазоні коефіцієнтів A, B, C, C_1, D система (3.8), (3.9) має рішення у вигляді затухаючих коливань $\rho(t)$ і $m(t)$ з періодом при великих t , рівним

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{DA - BD^2 / C_1 - (BD / 2C_1)^2}}. \quad (3.10)$$

Швидкість відшаровування мікрочастинок $\frac{dN}{dt}$ пов'язана з величиною m наступним наближеним співвідношенням:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\alpha k S D m}{d^2 m_{lok}}, \quad (3.11)$$

де α — частка зареєстрованих частинок до всіх, які відшарувалися за період реєстрації, k — відношення безпосередньо контактуючої площі до всієї робочої площі зразка ($k < 1$ через шорсткість зразка), S — площа поверхні зразка, d — розмір області локалізації руйнування, m_{lok} — густина внутрішньої вільної поверхні, при якій відбувається руйнування. Звідси коливання $m(t)$ визначають відповідні коливання характеристики $\frac{dN}{dt}$ процесу зношування.

Як феноменологічна модель взаємодії відповідних потоків дефектів в рамках схеми гомеостазиса приймемо бруселятор, або систему «хижак – жертва» [30, 39].

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} - \frac{n}{n_0} \right),$$

$$\frac{\partial n}{\partial \varepsilon} = -\frac{n}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right).$$
(3.12)

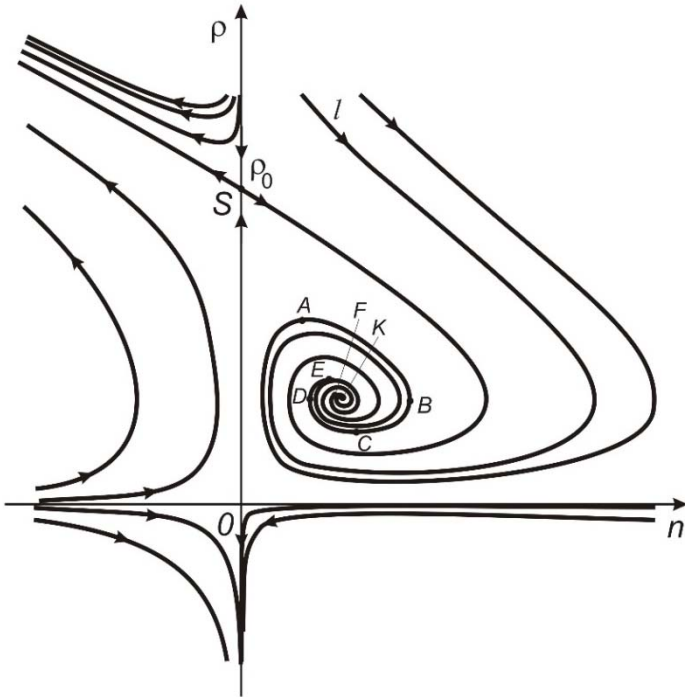


Рис. 3.3. Періодична зміна параметрів системи (3.12) [17]

Тут ρ - густина дислокацій, що представляє «хижака»; n - густина вакансій, що відповідає «жертві»; ρ_0, ε_0 - позитивні постійні. Перший доданок в правій частині першого рівняння описує розмноження дислокацій в полі деформації, друге – їх анігіляцію, третє – їх анігіляцію при взаємодії з вакансіями. У другому рівнянні перший доданок відпові-

дає процесу регресії густини джерел вакансій, друге описує зворотний процес за рахунок взаємодії з дислокаціями.

Якісний аналіз нелінійних рівнянь показує, що взаємодія складових направлена до встановлення автоколивань [17].

Проведені нами експерименти виявляють схоже явище періодичної зміни параметрів (маси мікрочастинок, що відшаровуються, періодичної зміни мікротвердості) при трибологічній взаємодії матеріалів при сухому терті (експерименти були проведені на машині тертя СМЦ-2 на роликкових зразках з бандажної і рейкової сталей). Деградація поверхневої структури відбувається за механізмом, подібним до деградація структури внутрішніх ділянок, але легше для спостереження, тому ми використовуємо цей приклад в якості аналога руйнування ОМНП від втомних пошкоджень. Цей ефект, що має безперечну прикладну значущість, за своєю природою, в контексті схеми гомеостазиса, пов'язаний з передуючими руйнуванню поверхневого шару процесами трансформації ансамблів взаємодіючих структурних елементів [38] – дислокацій і вакансій (носіїв дефектності середовища, генеруючих емісійні ефекти) і мікротріщин (носіїв руйнування).

На рис. 3.4. приведено як приклад графік величини $\frac{dN}{dt}$ (суцільна крива), одержаний за допомогою співвідношення (3.10) і чисельного рішення $m(t)$ системи рівнянь (3.8) і (3.9) для характерних значень параметрів $A = 2 \cdot 10^{-2} s^{-1}$, $B = 2,5 \cdot 10^{-18} m^2 s^{-1}$, $C = 10^{-7} ms^{-1}$, $C_1 = 3 \cdot 10^{-15} m^2 s^{-1}$, $D = 3 \cdot 10^{-2} s^{-1}$, і за початкових умов $\rho(0) = 5 \cdot 10^{12} m^{-2}$, $m(0) = 1,6 \cdot 10^5 m^{-1}$.

Порівняння даного графіка з експериментально одержаною кривою $\Delta N(t)/\Delta t$ (ΔN - частка (маса) зареєстрованих частинок за час Δt) при лінійній швидкості контртіла $v = 1 m/s$, тиску $P = 3 MPa$, $\alpha = 0,2$, $k = 0,01$, $S = 10^{-4} m^2$, $d = 10^{-6} m$, и $m_{lok} = 3 \cdot 10^8 m^{-1}$ свідчать про задовільну кількісну відповідність пропонованої моделі з експериментальними даними. Відповідно можна зробити обґрунтоване припущення, що при руйнуванні ОМНП можна використовувати отримані моделі.

Зміна мікротвердості H_V при різних ступенях зовнішньої деформації ε показує, що на звичну монотонно зростаючу залежність $H_V(\varepsilon)$ накладається ряд провалів (рис. 3.5) Оскільки значення H_V задається

густиною ρ нерухомих дислокацій, то можна вважати, що наявність провалів на залежності $H_V(\varepsilon)$ означає таку ж поведінку величини $\rho(\varepsilon)$.

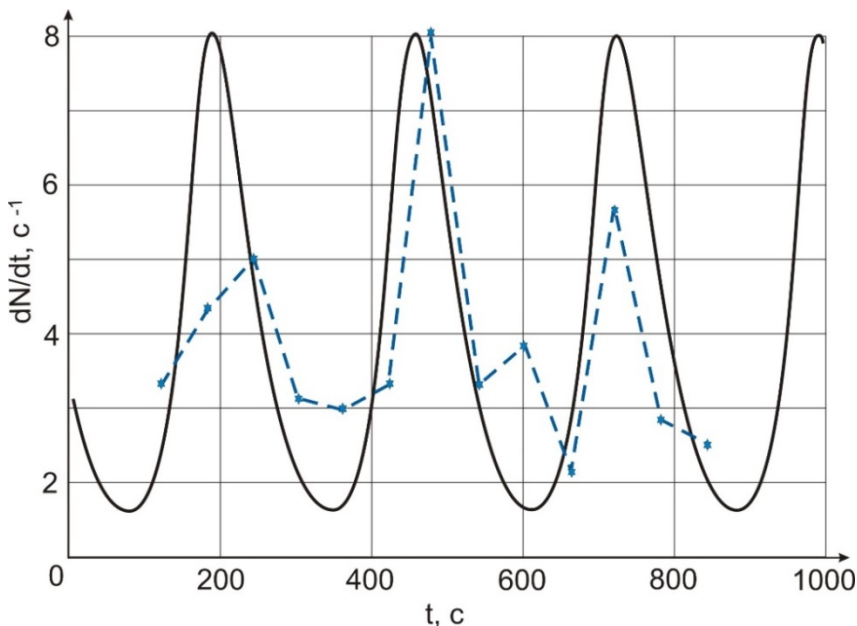


Рис. 3.4. Залежність маси відшаровування частинок від часу t .
Суцільна крива – розрахунок, штрихова – експеримент

Оскільки кожний з витків відповідає провалу на залежності $H_V(\varepsilon)$, то з рис. 3.5 виходить, що насправді спіраль повинна містити невелику кількість таких витків. Із зростанням деформації ε система еволюціонує по одному з них, наприклад витку $ABCDE$. При цьому густина дислокацій спочатку зменшується від ρ_A до ρ_C (на кривій залежності $H_V(\varepsilon)$ це відповідає спадаючій гілці провалу мікротвердості) а потім відбувається зворотнє зростання $\rho(\varepsilon)$ по траєкторії CDE (відповідно потрапляємо на висхідну ділянку залежності $H_V(\varepsilon)$). В ході такої еволюції густина вакансій n росте на ділянці AB ; подальше зме-

ншення густини дислокацій $\rho(\varepsilon)$ і об'єднання цих областей приводить до спаду величини n на ділянці $B CD$; остаточне збільшення густини n на ділянці DE пов'язане із зростанням густини дислокацій ρ . Звуження спіралі з наближенням до точки F приводить до зменшення амплітуди коливачь густини дислокацій ρ і, як наслідок, до спаду глибини провалів мікротвердості $H_V(\varepsilon)$.

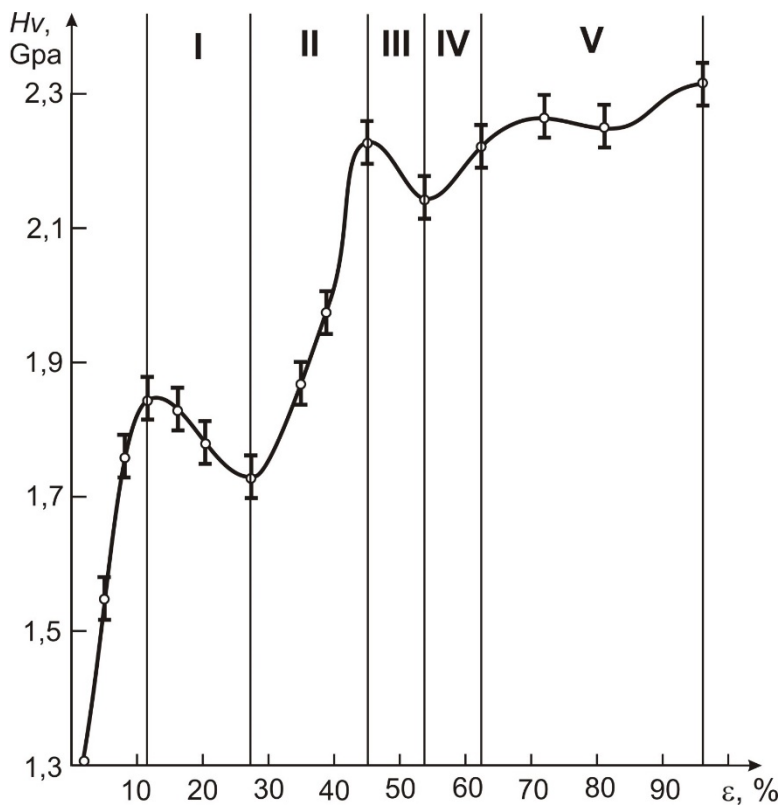


Рис. 3.5. Залежність мікротвердості при різних ступенях зовнішньої деформації

Представлена теоретична картина порівняно з експериментальними кривими $\Delta N(t)/\Delta t$ (ΔN - частка зареєстрованих частинок за час Δt) і

кривими мікротвердості $H_V(\varepsilon)$ свідчать про задовільну кількісну відповідність моделі з експериментальними даними і, таким чином, можна припустити, що як найважливіша складова задачі вироблення адекватних динамічних образів ключових явищ, що відбуваються в системі в процесі її деградації, є дослідження універсальних механізмів коливально-хвильових процесів, відповідальних за встановлення в системі коливань, що самопідтримуються [25].

Ця схема може бути коректно реалізована в рамках прийнятої схеми формалізації, якщо виходити з перших принципів, сформульованих польовими теоріям.

Для з'ясування цього питання потрібен ряд додаткових результатів, пов'язаних зі встановленням якісної визначеності системи.

3.2. Встановлення якісної визначеності системи

Дамо філософське розуміння якісної визначеності системи: «система має місце бути до тих пір, поки її властивості не вийдуть за певні межі, після чого вона перестає бути колишньою системою, і стає іншою: система виходить за область визначення» [40].

Одним з керівних принципів встановлення якісної визначеності системи є побудова математичних моделей еволюційних процесів, що визначають просторово-часові ефекти еволюції системи, і адекватне відображення в них всієї сукупності співвідношень, що описують міру якості (стійкість), що дозволяє вивчати поведінку системи в динаміці її функціонування [1, 14, 26, 29, 31, 32, 44, 46].

Запропонуємо наступну схему викладу досліджень в цьому розділі. Оскільки ми збираємося досліджувати еволюцію системи згідно схеми гомеостазиса, в якій присутня взаємодія конкуруючих процесів накопичування (накопичення) дефектності і дисипації збурень, є підстави вважати, що як адекватна модель, можуть ефективно використовуватися нелінійні динамічні рівняння. Але оскільки вид цих рівнянь дуже складний, слід спростити модель, залишивши в ній тільки найістотніші чинники.

Для цього слід скористатися методологічною схемою, яка б дозволила представити досліджувану систему еквівалентною моделлю в термінах польової теорії (пункт 3.2.1), потім узагальнити дані про явища, що вивчаються, і на цьому матеріалі дати опис еквівалентної картини, що виявляє відображення універсальних нелінійних механізмів, що лежать в основі процесів, які вивчаються (пункт 3.2.2). Поставивши від-

повідну задачу для простої еквівалентної моделі, її слід вивчити аналітично і зробити висновок про якісну визначеність системи, як об'єкту, схильного до деградації (пункт 3.2.3).

3.2.1. Вибір методологічної схеми

Виділимо міркування, які прояснюють вибір методологічної схеми, на які ми спиратимемося надалі.

Перше. Сучасний етап досліджень у області руйнування матеріалів характеризується розділенням досліджень на цілий ряд, що відноситься до компетенції як прикладних, так і фундаментальних наук. А саме:

- основна задача сучасної теорії деформації полягає в побудові моделі твердого тіла, що деформується, яка повинна враховувати його складну і багаторівневу організацію, різні види деформації, з одного боку, і напруги, що породжують їх, з іншого;
- задача фізики твердого тіла, в цьому плані, полягає в розгляді мікромасштабного рівня і побудові теорії механічної поведінки кристалів, в якій враховуються конкретні фізичні механізми явища і їх вплив на відповідні параметри рівнянь структурної організації кристалів [9, 47];
- фізика пластичності і міцності описує закони руху структурної недосконалості в навантаженому твердому тілі, використовуючи методологію теорії дефектів, зокрема, апарат теорії дислокацій;
- відома спроба описати руйнування як часовий процес в рамках дислокаційних моделей термофлуктуаційного зародження мікротріщин;
- при описі процесу накопичення пошкоджень, обумовлюючого вичерпання міцності матеріалів в часі, широкий розвиток одержали також феноменологічні моделі, в яких визначальні руйнування процеси розглядаються на рівні застосовності механіки суцільних середовищ (на макрорівні). Найбільш широко відомий принцип підсумовування пошкоджень і його детерміновані і статистичні інтерпретації. У таких підходах накопичення пошкоджень або ототожнюється з яким-небудь одним явищем, відповідальним за поступове руйнування матеріалу, або описується параметром, інтегрально характеризуючим всі чинники пошкоженості без урахування впливу окремих з них на процес вичерпання міцності в часі [20];
- паралельно із феноменологічною теорією руйнування, в літературі пропонується широкий ряд скалярних, векторних і тензорних моделей руйнування [3, 41];

- важкооглядний масив експериментальних даних, одержаних, нерідко, з використанням ювелірної експериментальної техніки, дає добре уявлення про механізм формування елементарних актів і законів розвитку і накопичення дефектності [3]. Не тільки зрозумілі структурно-фізичні механізми реалізації процесів, але і створені ефективні способи розрахунку, детально вивчені основні механізми руху дефектів на мікромасштабному рівні і дані якісні інтерпретації багатьох закономірностей макродеформацій і макроруйнування, створені аналітичні співвідношення, що забезпечують прогноз механічної поведінки реальних макроскопічних об'єктів.

Друге. Слід зазначити парадоксальність поєднання високої уваги до проблеми безпеки технічних систем і досить скромного просування в усвідомленні фізичної картини явища руйнування, причиною чому є надзвичайна її складність. Не говорячи вже про номенклатурний прояв цієї складності, – інтерпретація явища руйнування вимагає залучення фахівців з фізики, хімії, механіки, інженерів-конструкторів - в реальних умовах процес руйнування виявляється надзвичайно різноманітним чином. Рішення проблеми в рамках використовування досягнення окремих наук призводить, по суті, до розділення досліджень на ряд відповідних фундаментальних напрямів. Тим часом, такі дослідження, безумовно володіючи значною глибиною теоретичних і практичних розробок, виходять з різних концептуальних позицій, тому неможливе їх механістичне об'єднання в щось ціле, що задовольняє загальнішої задачі, ніж ті, які вважаються актуальними в кожному з цих напрямів.

Багато в чому це пов'язано з різноманіттям елементарних актів руйнування, при інтерпретації яких до останнього часу панували модельні уявлення, засновані на простих геометричних образах [41].

Загальним недоліком існуючих математичних моделей на основі фізичних уявлень про механізми руйнування є те, що вони не знаходять широкого застосування в практиці інженерних розрахунків. Прості варіанти моделей не дають тут необхідної точності, а складні є громіздкими і містять декілька параметрів підгонки.

Третє. Зміна парадигми наукового мислення, що відбувається в даний час, припускає замість розділення на частини досліджуваного процесу розглядати його як системний, виходячи з синергетичного світогляду [1, 28, 33]. Синергетика, використовуючи калібрувальні теорії, виписані з перших принципів і, формуючи таким чином єдину схему формалізації фізичних процесів, виражає в теорії ті аспекти фізичних процесів, які пов'язані із загальними системними властивостями. Нелінійні рівняння, що становлять основу цієї теорії, дозволяють за допомогою достатньо простих моделей описувати різні процеси, виробляти уявлення про якісні

риси цих процесів, що виражають тенденцію процесу до нестійкості і переходу до хаотичного руху.

Можливим підходом в рамках синергетики є розвиток польової методологічної схеми накопичення пошкодженості в системі.

Перспективним напрямом в рішенні цієї задачі є використання досягнень сучасної нелінійної динаміки [25]. Вона, на нашу думку, враховує найістотніші риси еволюційного процесу перебудови структури деградуючого матеріалу і дозволяє одержати достатньо просту математичну модель накопичення пошкодженості з метою її використання при рішенні інженерних задач безпеки ОМПН.

Крім того, нелінійна динаміка в такому об'ємі, мабуть, вперше застосовується до аналізу проблеми забезпечення безпеки ОМПН. Її можливості на нинішньому етапі не цілком зрозумілі. Тому доводиться йти не по найпростішому і логічному шляху: від загальної теорії до конкретних методик і рекомендацій, а діяти інакше. Доводиться одночасно з'ясувати можливості різних методів і моделей, задач безпеки ОМПН, що раніше не використовувалися і визначати області їх застосування. Доводиться виробляти нові уявлення і з цієї точки зору переоцінювати поставлені раніше задачі і методи їх рішення.

3.2.2. Еквівалентна картина у фізичній мезомеханіці

Кажучи про вибір методології для вирішення поставленої в підрозділі задачі, будемо виходити з уявлень, що розвиваються мезомеханікою.

Всі моделі фізичної мезомеханіки в своїй основі розглядають навантажене тверде тіло як ієрархічно організований ансамбль базових структур руйнування (дефектів), які можуть рухатися по схемі «зсув+обертання» у вихровому механічному деформаційному полі (рис 3.6).

У структурно неоднорідному середовищі будь-яке зрушення в певному структурному елементі супроводжується його обмеженим поворотом на вищому структурному рівні. У матеріалі, що деформується, виникає поле поворотних моментів, яке приводить у самоузгоджений рух всю ієрархію структурних рівнів середовища, що супроводжується осциляціями локальних концентраторів напруг.

В умовах, коли повороти мають елементи структур високих масштабних рівнів, а можливості акомодаций низьких масштабних рівнів вичерпані, виникають небезпечні мезоконцентратори напружень. Вони релаксують генерацією дисклінацій і мезополос локалізованої деформа-

ції, які обумовлюють фрагментацію матеріалу і виникнення численних несучільностей матеріалу, що викликає його руйнування [16].

Розглянемо еквівалентну картину еволюції структури системи при деградації, ґрунтуючись на формальній аналогії між хвилею деформації і електромагнітною хвилею і фазовими перетвореннями [11].

Згідно електродинамічної аналогії, стійкість процесу підтримується механізмом компенсації між часовими і просторовими варіаціями польових змінних, тобто можна сказати, що середовище втрачає просторо-часовий компенсаційний механізм, воно втрачає здатність зберігати свій стан як континуальне тверде тіло, і ця подія і є руйнуванням [13].

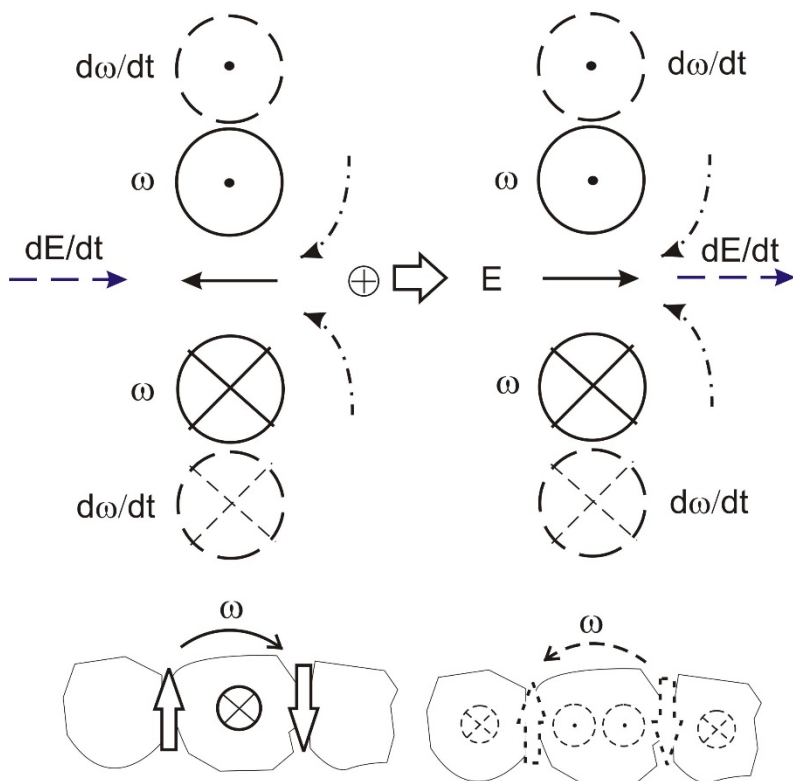


Рис. 3.6. Польове уявлення руху базових структур руйнування

Цей механізм представляється в значенні аналогії Максвелла, реалізацією складного самоузгодженого процесу, в якому взаємовплив фі-

зичних полів зовнішньої дії і відгуку на них навантаженого середовища визначає параметри структури, що зароджується, що вводить даний процес в єдиний клас універсальності з фазовими переходами [16].

Ключовий момент полягає в ідеї фрактального представлення дисипативних структур, що формуються, в процесі накопичення пошкодженості, в яких відбувається направлений потік енергії від дрібних масштабів до крупних і виникнення хаотичного руху з регулярного.

Проведені експерименти підтверджують висунуте припущення: на мікрофотографіях (рис.3.7) видно області вихрових дисипативних структур [11] різних діаметрів, що указує на фрактальність їх організації.

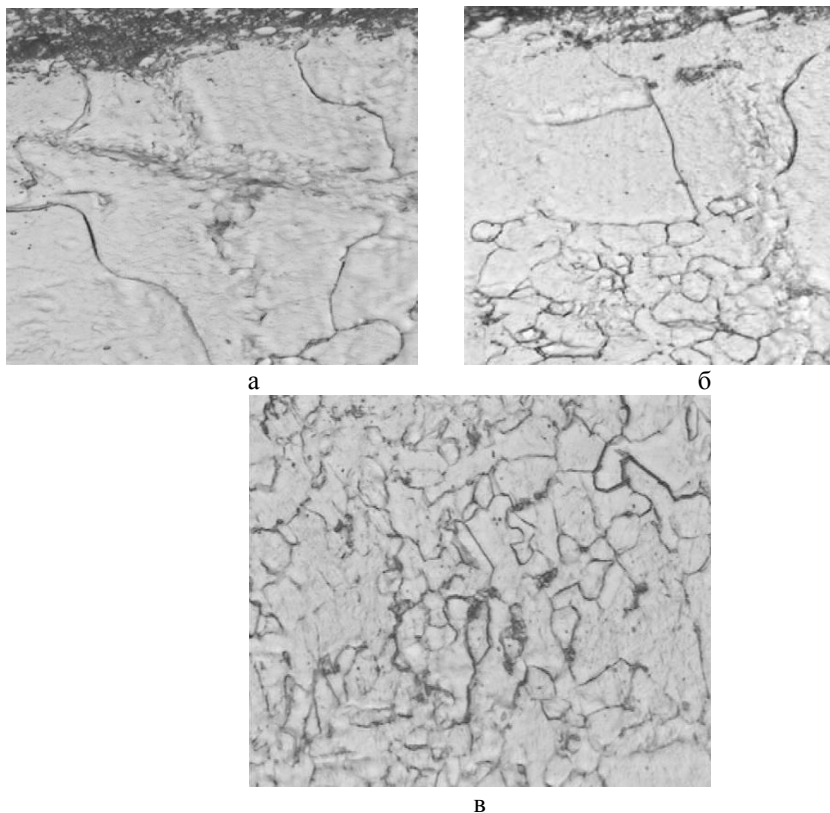


Рис. 3.7. Формування мезокластерів пошкоджуваності
а – початкова стадія формування мезокластера;
б – область розвинутих ротаційно-трансляційних вихорів;
в – стадія розбивки мезокластерів та їх перехід в ротаційно-трансляційні вихори

На рис. 3.7,а приведена початкова стадія формування кластера. На рис. 3.7,б представлена більш розвинена структура ротаційно-трансляційних вихорів, що має явно виражену фрактальність. Фрактальна організація виявляється у тому, що між крупними вихорами розташовуються дрібніші, не порушуючи суцільності матеріалу. Із зменшенням діаметрального розміру вихору їх кількість зростає.

На рис. 3.7 в приведена стадія активного функціонування ротаційно-трансляційних вихорів і розбиття мезокластерів на дрібніші фрагменти. Механізм цієї фрагментації є проявом принципу масштабної іваріантності [19] при накопиченні пошкодженості середовища і дає методологічну основу для аналізу процесу.

Побудована польова аналогія дозволяє алгоритмічно коректно використовувати електродинамічну феноменологію для побудови математичної моделі, що реалізовує статистичні уявлення і ідеї синергетики [2, 5, 21, 27, 33].

3.2.3. Побудова еволюційної польової моделі

Розглянемо послідовно методику побудови визначальних співвідношень. Спочатку виберемо феноменологію, що дозволяє представити наявність осциляцій «зсув+обертання» в системі, обумовлені вихровим деформаційним полем.

Звернемо увагу відповідно до прийнятої вище польової схеми, заснованої на електродинамічній аналогії, на універсальне відображення, що характеризує рух частинки в магнітному полі і в полі хвильового пакету і містить частини, що визначають два типи рухів – з обертальною і трансляційною симетрією – і їх взаємодію [25]. Цей опис відповідає польовому представленню розповсюдження в навантаженому тілі хвиль перемикання як осцилюючого руху мезоб'ємів по схемі «зсув+обертання» у вихровому деформаційному полі.

Початкові рівняння руху частинки мають вигляд [25]

$$\mathbf{r} = \frac{\ddot{\mathbf{e}}}{m} \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) + \frac{\mathbf{e}}{mc} [\dot{\mathbf{r}}\mathbf{B}], \quad (3.13)$$

де $\mathbf{r} = (x, y)$ - вектор, лежачий в площині (x, y) ; \mathbf{E} – хвильовий пакет, що розповсюджується уздовж осі x і направлений уподовж x ; \mathbf{B} – постійне магнітне поле, направлене уздовж осі z . Відсутність залежності правої частини (3.13) від y приводить до інтеграла руху

$$\dot{y} = v_y = -\omega_0 x + const ,$$

де ω_0 - є циклотронна частота.

Для хвильового пакету $E(x, t)$ приймемо наступний вираз [25]:

$$\begin{aligned} E &= -E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sin(kx - \omega t - nvt) = \\ &= -E_0 T \sin(kx - \omega t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \end{aligned} \quad (3.14)$$

де \mathbf{E}_0 направлено уздовж осі x і $T = 2\pi / \nu$.

Підставляючи (3.14) в (3.13), одержуємо рівняння

$$\ddot{x} + \omega^2 x = -\frac{e}{m} E_0 T \sin \vartheta \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (3.15)$$

Воно описує рух частинки в магнітному полі, перпендикулярному полю хвильового пакету і еквівалентно схемі лінійного осцилятора, на який діють короткі (δ -подібні) поштовхи з періодом T [23, 25].

Для переходу від (3.15) до різницевого рівняння відповідно до [23] позначимо

$$x_n = x(t_n - 0), \quad \dot{x}_n = \dot{x}_n(t_n - 0).$$

Співвідношення між величинами x, \dot{x} зліва і праворуч від δ -функції мають вигляд

$$\begin{aligned} x(t_n + 0) &= x(t_n - 0), \\ \dot{x}(t_n + 0) &= \dot{x}(t_n - 0) - \frac{e}{m} T E_0 \sin \vartheta, \end{aligned}$$

де $t_n = nT$. Ці співвідношення приводять до наступного відображення:

$$\begin{aligned}
 v_{x,n+1} &= -\omega_0 x_n \sin(\omega_0 T) + [v_{x,n} + \frac{e}{m} E_0 T \sin(n\omega T - kx_n)] \cos(\omega_0 T). \\
 x_{n+1} &= x_n \cos(\omega_0 T) + (1/\omega_0) [v_{x,n} + \frac{e}{m} E_0 T \sin(n\omega T - kx_n)] \sin(\omega_0 T).
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

При $\omega_0 \rightarrow 0$ відображення (3.16) переходить в стандартне відображення Чирікова – Тейлора [25], представляючого одну з простих моделей виникнення хаосу, і в якій збережені найхарактерніші риси цієї проблеми.

$$\begin{aligned}
 v_{x,n+1} &= v_{x,n} + \frac{e}{m} E_0 T \sin(kx_n) \\
 x_{n+1} &= x_n + T(v_{x,n+1} - \omega/k)
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

На рис. 3.8 представлений фазовий портрет системи. Він складається з нескінченного числа інваріантних кривих і стохастичних шарів, що чергуються. Найважливіша властивість фазового портрета полягає у тому, що він має фрактальну структуру [25].

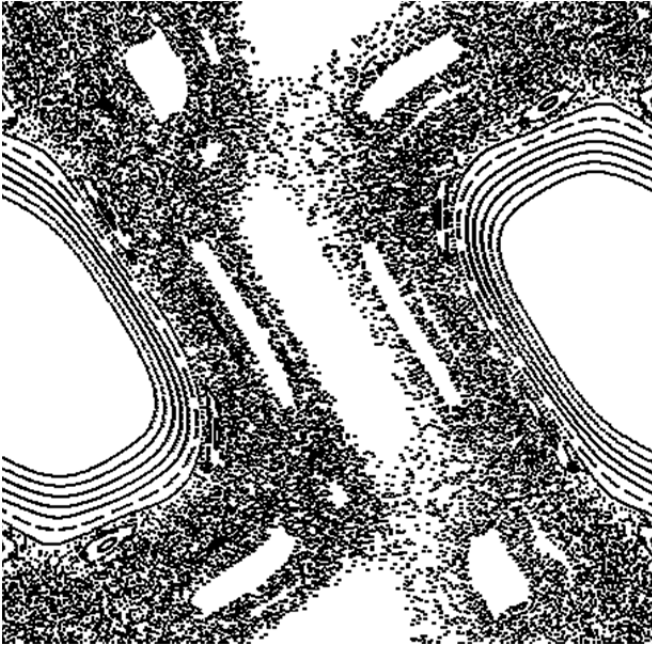


Рис. 3.8. Фазовий портрет трансляційно-ротаційної динаміки дефектів

Гамільтоніан еквівалентної динамічної системи, що породжує це відображення, має вигляд

$$H = \frac{1}{2}I^2 - K \cos \vartheta \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t/T - n). \quad (3.18)$$

і задає еволюцію зв'язаного ланцюжка мезоструктур в полі хвильового пакету.

Цими мезоструктурамі є різного роду носії ебурень, які знаходяться в деякому зовнішньому деформаційному полі і, крім того, взаємодіють з найближчими сусідами [24].

Перепишемо (3.18) у вигляді [25]:

$$H = \frac{1}{2} \sum_k p_k^2 + \frac{1}{2} \sum_k [\Phi(u_{k-1} - u_k) - \Phi(u_{k+1} - u_k)]^2 + \sum_k V(u_k), \quad (3.19)$$

де (u_k, p_k) - координата (зсув) і імпульс k -ї частинки ланцюжка ($p_k = m\dot{u}_k$) (маса прийнята рівній одиниці); Φ - потенціал парної взаємодії частинок, залежний від їх взаємного розташування; $V(u_k)$ - потенціал зовнішнього періодичного поля з періодом a_0 :

$$\begin{aligned} V(u_k + a_0) &= V(u_k) \\ u_{k+1} - u_k &= a \end{aligned} \quad (3.20)$$

Для конкретності покладемо

$$V(u) = -V_0 \cos\left(\frac{2\pi}{a_0} u\right). \quad (3.21)$$

У твердому тілі поле обумовлене дією всієї решітки на даний вузол решітки. Це означає, що частинки знаходяться в періодичному полі з просторовим періодом a_0 .

Рівняння руху з урахуванням (3.21) набувають вигляд різницевого рівняння Синус-Гордона [23]:

$$\ddot{u}_k = \frac{\partial^2 H}{\partial p_k^2} = u_{k+1} - 2u_k + u_{k-1} + \frac{2\pi}{a_0 V_0} \sin\left(\frac{2\pi}{a_0} u_k\right) \quad (3.22)$$

Рішення стаціонарної задачі (рівновага ланцюжка) задається за допомогою відображення

$$\bar{I} = I + \frac{2\pi}{a_0} V_0 \sin\left(\frac{2\pi}{a_0} u\right), \quad u_{k+1} = u_k + I_{k+1} \quad (3.23)$$

де $I_k = u_k - u_{k-1}$, яке і співпадає із стандартним відображенням [25].

Відображення (3.23) має періодичні і хаотичні рішення. Їх локалізація у фазовому просторі залежить від параметра V_0 .

Аналіз рівняння (3.23) пов'язаний з визначенням власних значень його якобієвої матриці, для якої маємо наступне рівняння:

$$\lambda^2 - (2 + K)\lambda + 1 = 0, \quad (3.24)$$

де позначено $K = (2\pi / a_0)^2 V_0$.

Знаходимо λ з рівняння (3.24):

$$\lambda_{1,2} = 1 + \frac{1}{2}K \pm \sqrt{(1 + \frac{1}{2}K)^2 - 1} \quad (3.25)$$

і локальна нестійкість визначається корінням

$$\lambda_{1,2} = 1 + \frac{1}{2}K + \sqrt{(1 + \frac{1}{2}K)^2 - 1},$$

який завжди більше одиниці, якщо $K > 0$

Звідси витікає, що нестійкість можлива при $K > 0$, $\lambda_1 > 1$ і при

$$K < -4, \quad \lambda_2 < -1 \quad (3.26)$$

Оскільки фазовий простір системи кінцевий, то фазові траєкторії не можуть розійтися через нестійкість більш ніж на характерний розмір простору і починається їх заплутування [21]. Тому така нестійкість локальна. Позначимо через $D(t)$ відстань між двома точками у фазовому просторі, що належать різним траєкторіям у момент часу t .

Формальне визначення локальної нестійкості наступне [25]:

$$D(t) = D(0)e^{h_0 t} \quad (3.27)$$

де інкремент нестійкості h_0 є функцією точки у фазовому просторі. Більш того, має місце співвідношення $h_0 \sim 1/\tau_c$, де τ_c - час розчіплення кореляцій. Це співвідношення носить принциповий характер [24]. Воно встановлює зв'язок між статистичними властивостями системи (τ_c) і її динамічною характеристикою h_0 : поява позитивної ентропії h пов'язана з перетворенням ламінарного перебігу фазової рідини в турбулентний. Це зауваження указує на глибокий зв'язок між процесом виникнення турбулентності [34] і перебудовою структури системи в процесі накопичення пошкодженості [47].

Оскільки відображення (3.23) визначає розташування осциляторів в ланцюжку, то тим самим визначаються можливі структури. Умова мінімуму вільної енергії [25]

$$F = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{2} (I_n - a)^2 + V(u_n) \right] \quad (3.28)$$

приводить до рішення, яке означає, що

$$u_{n+1} - u_n = \text{const} = ma_0 \quad (3.29)$$

Умова (3.29) показує, що дане рішення відповідає відстані ma_0 між частинками в ланцюжку, тобто кратне періоду поля $V(u)$.

Зручно представити результат обчислень у зіставленні зі схемою фазового переходу другого роду [36], відобразивши залежність величини $k = 2\pi/\lambda$ від $\delta = ma_0 - a$. Величина k є параметром порядку [23].

Якщо $\delta < \delta_c$ реалізується рішення (3.29). У нього довжина хвилі модуляції рівна нескінченності, тобто $k = 0$. Проте при $\delta > \delta_c$ з'являється рішення з $k \neq 0$ і амплітудою модуляції $\sim \sqrt{V_0}$. Виникаючий біфуркаційний перехід аналогічний фазовому переходу другого роду.

Принципова можливість використання даної методології заснована на універсальності нелінійних явищ у світлі класичного феноменологічного скейлінга А.М.Колмогорова при формуванні каналу аттракції динамічних систем [7, 45].

Пояснимо останнє. Максимальній локальній нестійкості відповідає руйнування всіх інтегралів руху [25]. В цьому випадку відбувається рух з перемішуванням [34]. Динамічні системи, які володіють властивостями локальної нестійкості і перемішування, не обумовлені дією випадкових полів, є системами з погано передбачуваним майбутнім (К-системи) [23], і їх дослідження можливе в рамках теорії турбулентних структур А.М.Колмогорова [25].

Логіка подальшого дослідження вимагає виділити деяку формальну постановку задачі, яка відповідає загальній ситуації. Потрібно з'ясувати, коли регулярний рух системи зруйнуватиметься і її динаміка стане тією, що перемішується. Для цього достатньо з'ясувати умову, при якій виникає локальна нестійкість і ламінарний потік перетвориться на турбулентний [14, 46]. Принципова можливість даного підходу заснована на універсальності нелінійних явищ, пов'язаних з перерозподілом ефективної енергії між різномасштабними ієрархічно супідрядними динамічними підсистемами [25, 19], виступаючими у разі твердого тіла як дисипативні структури, що виконують роль каналу аттракції [36], в якому відбувається направлений потік енергії від дрібних масштабів до крупних [19] і виникнення хаотичного руху з регулярного [36].

3.3. Визначення особливостей поведінки системи

Принцип скейлінга дозволяє ввести показник пошкодженості і розкрити його діагностичні можливості для контролю стану навантажених об'єктів в експлуатації. Це висуває задачу дослідження фізичного змісту, математичного формулювання і практичного застосування принципу скейлінга в ієрархії масштабних рівнів накопичення пошкодженості.

Вище було розглянуте деяке наближення, що передає лише грубу структуру фазового портрету досліджуваної системи. Насправді, у всіх

вікнах фазового портрету є необмежене число стохастичних шарів вищого порядку [25].

Ця складність виявляється у фрактальній структурі стохастичного шару. Кожен острівцець і його мала околиця, насправді, представляють таку ж складну будову цієї частини фазового простору, як і вся область.

Найнаочніше складну фрактальну структуру демонструє множина Мандельброта (на рис. 3.9 приведена послідовність "знімків" множини Мандельброта, одержаних при зростаючому збільшенні. На них видно, що, "занурюючись" в множину Мандельброта, ми весь час зустрічаємо схожі один на одного фрагменти [35]).

Такі властивості фазового портрету системи виникають за цілком певних умов, в яких існування області стохастичності є неодмінною властивістю і характеризують дуже тонкі якості динамічних систем, які характеризуються хаотичною динамікою [24].

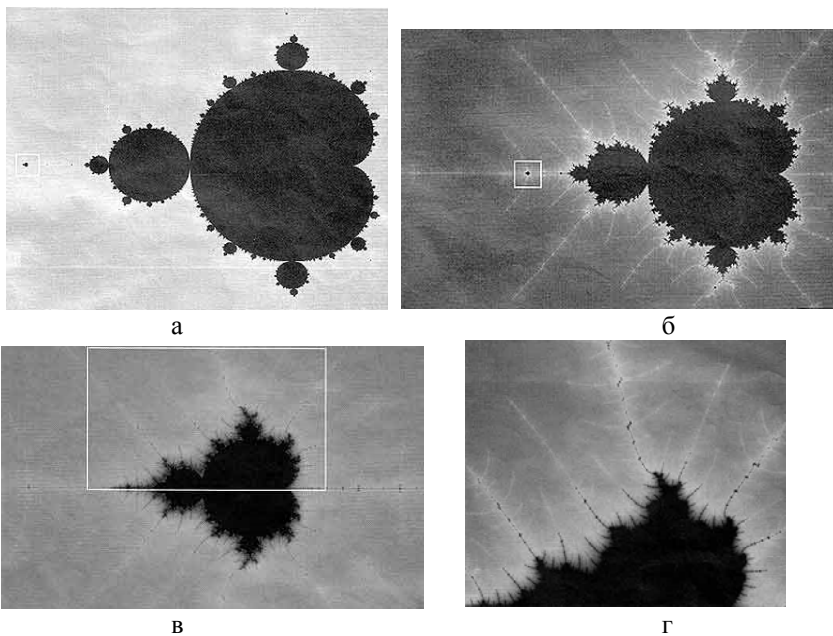


Рис. 3.9. Послідовність "знімків" множини Мандельброта

Ієрархічна складність фазового портрету розповсюджується також і на спосіб його аналізу [23, 39].

Грунтуючись на польовій інтерпретації рівнянь руху ієрархічної системи, що реалізує каскадний процес, еквівалентну картину ієрархії трансформації структури системи в ієрархічний механізм реакції середовища реалізуємо, слідуючи загальній схемі Обухова-Колмогорова руху триплетів.

Інтерпретуючи відповідно до [18] рівняння триплету моделлю Лоренца [8] для безрозмірних амплітуд X, Y, Z трьох мод триплету:

$$\begin{cases} X' = -\sigma X + \sigma Y, \\ Y' = rX - Y - XZ, \\ Z' = -bZ + XY, \end{cases} \quad (3.30)$$

де штрих означає похідну по безрозмірному часі, $\sigma = \text{Pr}$.

Фазовим простором системи (3.30) є тривимірний простір (X, Y, Z) (рис.3.10).

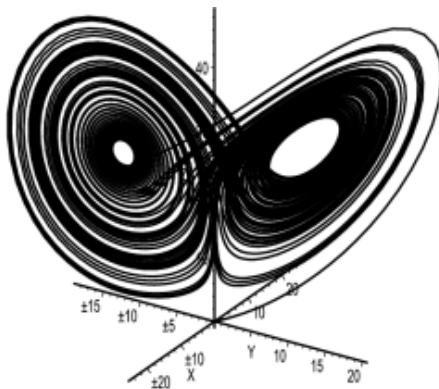


Рис. 3.10. Атрактор Лоренца

Спираючись на результати чисельного інтегрування і на відомості із загальної теорії динамічних систем [10], вкажемо наступну послідовність біфуркацій для системи (3.30) при $b = 8/3$ і $\sigma = 10$:

1) При $0 < r < 1$ система Лоренца має єдиний атрактор: стійку нерухому точку на початку координат $O(0,0,0)$ (рис.3.11 а).

2) У разі $1 < r < 13,926$ точка O втрачає стійкість, а атракторами стають дві нерухомі, стаціонарні точки $O1, O2$

$(-\sqrt{b(r-1)}, -\sqrt{b(r-1)}, r-1)$ (чисельно розраховані значення для стаціонарних точок співпадають з аналітичними). Фазові траєкторії наближаються до стійкої точки по спіралі, що відповідає затухаючим осциляціям. Чим більше параметр r , тим більше початковий розмах цих осциляцій (рис.3.11 б, в).

3) При $r \approx 13.926$ спіралі, починаються з нуля, потрапляють на його вхідну криву, утворюючи гомоклінічні траєкторії навколо стійкої точки (3.11 в).

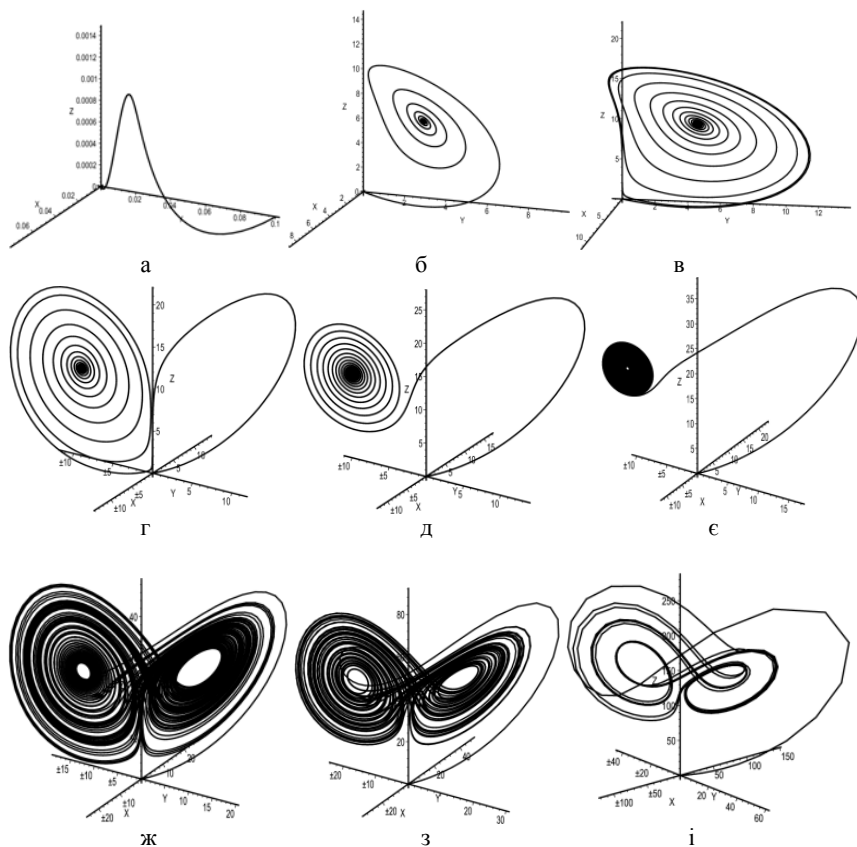


Рис. 3.11. Трансформація фазового портрету

4) У разі $13.926 < r < 24.06$ стаціонарні точки $O1$ і $O2$ залишаються стійкими, але траєкторії, зробивши петлю навколо однієї стаціонарної

точки, починають спіралевидно прагнути до іншої. При збільшенні γ розмах осциляцій починає зменшуватися (рис. 3.11 г, д, е).

5) При $\gamma \approx 24.06$ стаціонарні точки $O1$ і $O2$ продовжують залишатися стійкими, але траєкторії, що виходять з точки O , не прагнуть до них, а намотуються на седлові траєкторії. Замість граничної множини, яка не є атрактором, виникає безліч циклічних траєкторій, яка при $\gamma > 24.06$ стає притягаючим (рис. 3.11 ж).

6) У разі $\gamma \approx 24.74$ граничні цикли стягуються до стаціонарних точок $O1$, $O2$ і втрачають стійкість. Стійкою стає деяка гранична притягаюча множина - атрактор Лоренца.

7) У інтервалі $24.74 < \gamma < 148.8$ всі стаціонарні точки O , $O1$ і $O2$ є нестійкими. Стійким залишається лише атрактор Лоренца. У динамічній системі реалізується хаотичний режим руху. (рис. 3.11 з)

8) При $148.8 < \gamma < 500$ у фазовому просторі замість атрактора Лоренца утворюється граничний цикл, і рух в системі стає періодичним (рис. 3.11 і).

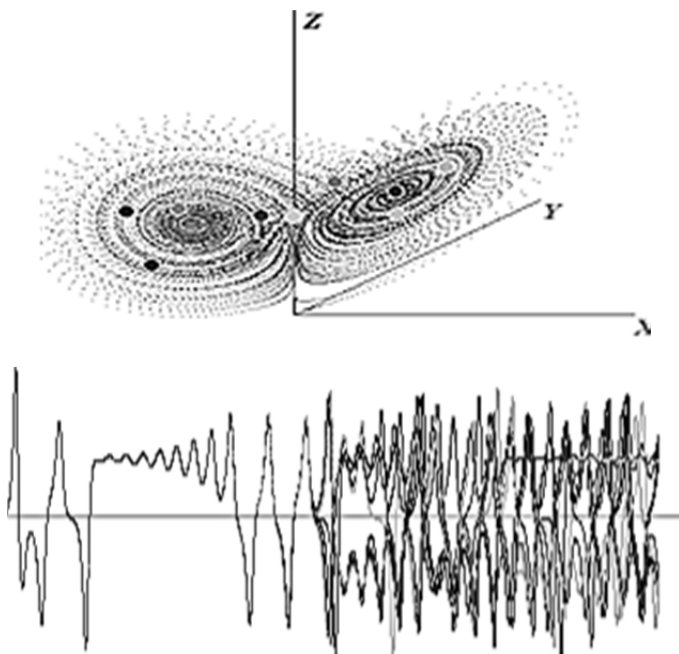


Рис. 3.12. Процес перемішування для 10 точок, початкові значення яких відрізняються на 10^{-4} : фазовий портрет і часова проекція

Розглянемо, при одних і тих же значеннях параметрів, набір точок, відмінних початковими умовами, і відслідкуємо, наскільки відрізнятимуться їх траєкторії надалі (на рис. 3.12 показано поведінку 10 точок, початкові значення яких відрізняються від середнього не більше ніж на 0.0001).

На фазовій діаграмі видно, що спочатку всі траєкторії практично невиразні. Проте якщо почекати якийсь час, то стає ясно, що вони істотно відрізняються. Іншими словами, в системі відбувається перемішування траєкторій.

Екстремальне наростання параметра зовнішньої дії r приводить до ієрархічного ланцюга перебудов дивного атрактора, знижуючого його розмірність [17].

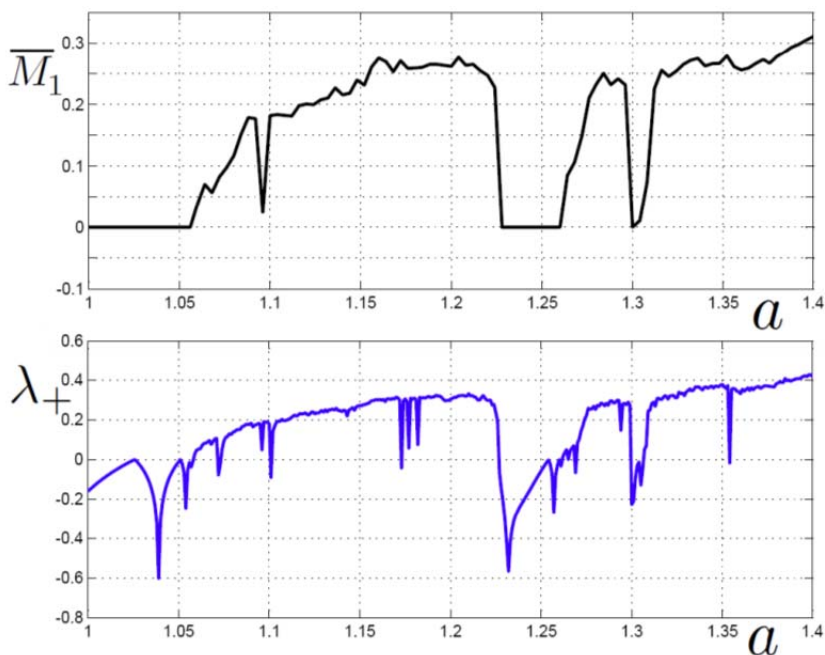


Рис. 3.13. Співвідношення перемішування та локального ляпуновського показника

Це приводить до дуже важливого результату, що має той зміст, який дозволяє співвіднести процес накопичення пошкодженості і сильну зміну топологічних властивостей системи еквівалентній картині каскад-

ного процесу перебудови структури системи, реалізація якого пов'язана з локальною нестійкістю і перемішуванням фазових траєкторій.

При зіткненні з необхідністю виявлення процесу перемішування виникають труднощі, пов'язані з неоднозначною залежністю локальних ляпуновських показників і величиною ступені перемішування [18] (рис. 3.13.).

Оскільки така поведінка системи приводить до ускладнення побудови її адекватних математичних моделей, виникає питання розділення фазового простору на області локальних моделей, тобто питання виявлення області хаотичної динаміки спостережуваної системи, рух фазових траєкторій на якій не прогнозований.

Цю обставину важливо мати на увазі, оскільки прояв діагностичних ознак ризику, як було показано вище, слід шукати у взаємозв'язку з внутрішньою стохастичністю системи, а саме з фрактальністю. Прояви фрактальності, будучи різноманітними за своєю природою [13], можуть в даному випадку вказати спосіб розбудови методу контролю розвитку процесу пошкодженості. Нижче буде вказано на можливість реалізації такого способу, пов'язаного з фрактальною розмірністю за допомогою параметру, що вводиться нижче.

3.4. Вивчення структури системи як єдності компонентів і зв'язків

Метою даного підрозділу є розробка теоретичного підходу до дослідження розвитку критичних процесів втрати працездатності системи, ведучих до ризику відмови, на основі результатів, одержаних в попередньому підрозділі.

Для цього в пункті 3.4.1, виходячи з польового трактування, виявляється універсальна обумовленість фрактальної топології процесу пошкодженості, а потім в пункті 3.4.2 режим критичного стану системи представляється схемою руйнування фрактального пучка (пункт 3.4.3) і співвідноситься (пункт 3.4.4) з фрактальним алгоритмом напрацювання на відмову. Цей алгоритм представляється фрактальною схемою накопичення пошкодженості в пункті 3.4.5 і вводиться параметр пошкодженості.

3.4.1. Універсальна обумовленість фрактальної топології процесу пошкодження.

Сама можливість динамічного хаосу, для системи, що знаходиться на порозі критичності (у режимі ризику), а головне, сценарій, за яким порядок переходить в хаос, виявляють загальні універсальні властивості складних динамічних систем і процесів [4, 16, 24]. Іншими словами, конкретний вид правила переходу до хаосу не є принциповим. Фундаментальне значення тут має природа явища (відношення його до певного класу універсальності).

Розглянемо трансляція-ротаційну динаміку дефектів [24] в рамках польової схеми (3.17) при $K > 1$. Рішення рівнянь (3.17) може бути записане у вигляді [23]

$$\mathcal{G}_n = 2\pi(n\nu + \nu_0) + f(n\nu + \nu_0) \quad (3.31)$$

де ν - довільна константа ($0 < \nu < 1$) і f - періодична функція з періодом $\frac{1}{\nu}$. Для кантор-тора f має складну розривну структуру.

Розглянемо відповідно до [24] відображення

$$q_{n+1} - 2q_n + q_{n-1} = \frac{1}{a^2} s(q_n), \quad (3.32)$$

де $0 < q < 1$, розривна функція $s(q)$ визначена формулою

$$s(q) = q - 1/2 - [q]$$

і $[q]$ означає цілу частину q .

Відмінність (3.32) від (3.17) полягає у тому, що періодична функція $\sin \mathcal{G}$ замінена іншою періодичною $s(q)$. Рішення (3.32) при малих a має вигляд [24]

$$q(\xi) = \xi - \frac{1}{(1 + 4a^2)^{1/2}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \rho^{-m} s(\xi + m\nu) \quad (3.33)$$

де

$$\rho = 1 + \frac{1}{2a^2} [1 + (1 + 4a^2)^{1/2}] \quad (3.34)$$

Чисельний аналіз (3.17) при зростанні параметра збурення $K = (e/m)E_0 kT^2$ виявляє багатомасштабну систему перебудови областей фазового простору: із зростанням параметра збурення K виникає послідовно нескінченне число біфуркацій, пов'язаних з розподілом стійких шарів і появою навколо них нових, також випробовуючих на собі, в свою чергу, біфуркації, визначаючи складне біфуркаційне дерево фрактального типу, відтворюючого ієрархію масштабів процесу пошкодженості системи (рис.3.14) аналогічну картині формування мезосубструктури при втомному руйнуванні [23].

Відзначимо, що приведений сценарій еволюції масштабних рівнів процесу пошкодженості вельми умовний, проте він дозволяє синхронному і взаємоузгодженому розгляду процесів на різних масштабних рівнях, для яких повинні бути розвинені принципово різні математичні методи моделювання, зіставити польове уявлення, яке через універсальність використовуваних закономірностей дозволяє єдиним образом представити процес еволюції системи і ввести параметр пошкодженості, що характеризує еволюцію дефектної структури і володіє, крім всього іншого, виходом на інженерний аспект.

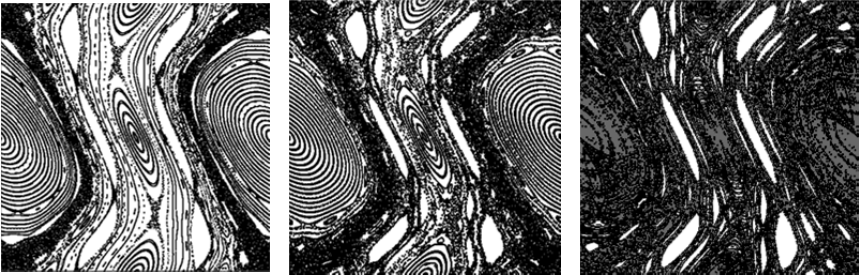


Рис.3.14. Послідовність перестроек фазового простору системи с ростом параметра возмущения

Потрібно з'ясувати, коли регулярний рух системи дефектів зруйнуватиметься і його динаміка стане тією, що перемішується.

3.4.2. Дослідження колективних ефектів, що визначають критичний стан системи

Згідно [19], повороти окремих осередків (див. схему «зсув-обертання»), обумовлені взаємодією потоків акомодативних деформаційних дефектів, сприяють релаксації мікроконцентраторів напруг з утворенням фрактальних ротаційних дисипативних структур. У свою чергу, мікроконцентратори напруг генерують деформаційні дефекти, що йдуть углиб матеріалу і т.д. Іншими словами, вони функціонують подібно «насосу», який генерує і закачує деформаційні дефекти в матеріал. При цьому в результаті вибудовування дрібномасштабних фрагментів у великомасштабну структуру еволюція дефектної структури є процесом виникнення складної ієрархічно супідрядної системи дефектів.

Для віддзеркалення ієрархічної супідрядності в ансамблі дефектів використовується геометричний образ дискретного ультраметричного простору - дерево Кейлі (рис. 3.15). Його вузли на даному структурному рівні відповідають ансамблям (станам [31], долинам або компонентам [27]) станів дефектів нижчих рівнів.

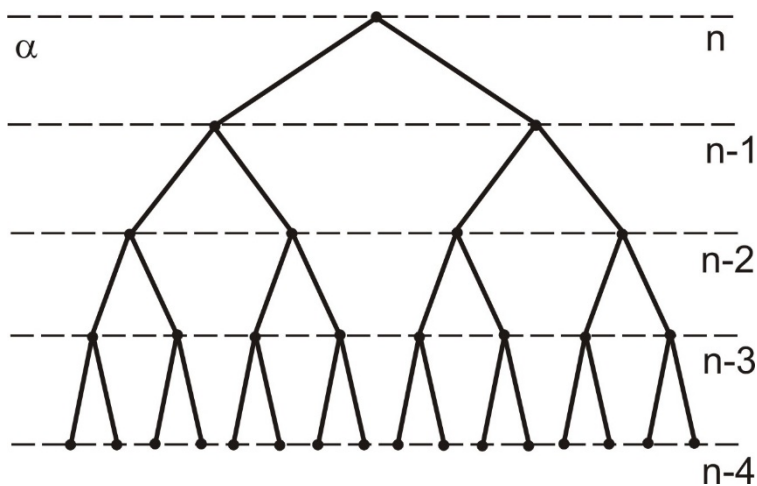


Рис. 3.15. Дерево Кейлі [16]

Основний аргумент на користь такого зв'язку рівнів полягає у тому, що на кожному з них поведінка системи визначається дефектами, які об'єднуються в кластери, що формують поведінку наступного рівня. Кожен подальший структурний рівень "зароджується" в надрах попередньо-

го" [35], коли той за рахунок підвищення однорідної густини дефектів вичерпує ресурс свого еволюційного розвитку.

Зобразимо точками на одному горизонтальному рівні непересічні кластери (див. рис. 3.15). Кожний з кластерів можна, в свою чергу, розбити на кластери, зображені на нижчому горизонтальному рівні, і продовжувати цю процедуру нескінченно, скільки завгодно малими кроками [77].

Таким чином, знання оператора, що представляє еволюцію ієрархічної дефектної структури, дозволяє повністю описати забезпечуваний цією еволюцією процес. При цьому сама перебудова структури представляється як марківський процес дифузії на дереві Кейлі [16].

Порушене питання достатньо тонке і пов'язане з відношенням системи до власних флуктуацій, тобто нестійкостей. Послідовний опис еволюції таких систем сходить до концепції потенційного рельєфу, який може міняти свою форму під зовнішньою дією [17].

Для з'ясування вказаної картини слідуватимемо припущенню, згідно якому стадії накопичення пошкодженості можуть бути пояснені складним рельєфом термодинамічного потенціалу в просторі станів, безліччю мінімумів різної глибини (багатодолінна структура), що узгоджуються з фрактальною картиною ієрархічного простору станів [37] (рис. 3.16).

Відповідно до цього еволюція системи вимагає, щоб спочатку заповнювалися найдрібніші мінімуми потенційного рельєфу, а потім – глибші і т.д. Тоді еволюція структури відповідає руху по вузлах ієрархічного дерева, що представляє геометричний образ ультраметричного простору [21].

Слідуючи [37], розглянемо поведінку ієрархічної системи.

Характеризуватимемо ієрархічний об'єкт на рівні n інтенсивністю, яка для стохастичної системи зводиться до густини імовірності і зростає з переходом на вищий рівень, що відображається рекурентним співвідношенням

$$P_{n-1} = P_n + N_n^{-1} w(P_n) \quad (3.35)$$

де $w(P)$ – функція ієрархічного зв'язку

У загальному випадку (див. рис. 3.15) реалізується ступенева апроксимація числа N_n вузлів на рівні n від розгалуженості ієрархічного дерева

$$N_n = s^n \quad (3.36)$$

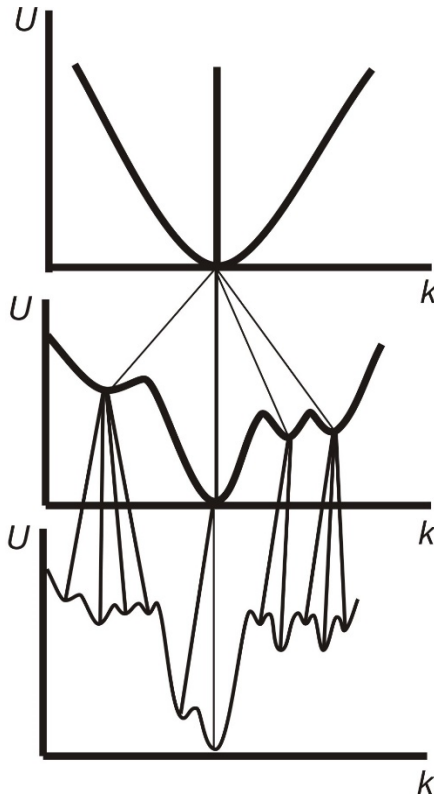


Рис. 3.16 Структура потенційного рельєфу термодинамічного потенціалу [16]

Умова $qP = 1$ $qP = 1$ приводить до асимптотики

$$w(P) = WP^\beta, \quad P \rightarrow 0, \quad (3.37)$$

де W - позитивна постійна. Вважаючи в (3.35) і (3.36), що при довільних значеннях P_n задовольняється скейлінгове співвідношення, приходимо до рекурентної рівності для функції x_n :

$$x_{n-1} = \phi(x_n), \quad \phi(x_n) = q(x + Wx^{1-D}) \quad (3.38)$$

Відображення $\phi(x)$ має дві стаціонарні точки, що відповідають умові $x = \phi(x)$: стабільну x_s і критичну x_c

$$x_c = \left(\frac{W}{q^{-1} - 1} \right)^{1/D}, \quad q = s^{-1/D} \quad (3.39)$$

В результаті поведінка системи представляється однорідними функціями

$$P_n = x_c s^{-n/D} \quad (3.40)$$

$$w_n = W^{1/D} (q^{-1} - 1)^{-\Delta} s^{-\Delta n}, \quad q = s^{-1/D} \quad (3.41)$$

де декремент

$$\Delta = \frac{1 - D}{D} \quad (3.42)$$

визначає масштаб ієрархічного зв'язку.

У межі $n \rightarrow \infty$ можна скористатися континуальним наближенням, в рамках якого кінцева різниця $P_n - P_{n-1}$ замінюється похідною dP / dn . Тоді рівність (3.35) переписується у вигляді

$$\int \frac{dP}{w(P)} = - \int \frac{dn}{N_n} = (\ln s)^{-1} \int \frac{d\zeta}{N(\zeta)}, \quad \zeta = (n_0 - n) \ln s \quad (3.43)$$

Розглянемо випадки розподілу N_n числа вузлів по ієрархічних рівнях з обліком (3.43). Для випадку регулярного дерева залежності інтенсивності P і сили ієрархічного зв'язку w від відстані в ультраметричному просторі ζ мають вигляд

$$P = W^{-1/(1-D)} [(1 - u) + ue^{\zeta - \zeta_0}]^{1/D}, \quad (3.44)$$

$$u = DW^{1/(1-D)} / \ln s, \quad \zeta_0 = n_0 \ln s$$

$$w = [(1 - u) + ue^{\zeta - \zeta_0}]^\Delta, \quad \zeta \leq \zeta_0 \quad (3.45)$$

З графіку функції $\phi(x)$ на рис. 3.17 видно, що система за декілька ітерацій досягає нульового значення, якщо початкове значення x_0 менше за критичне x_c . При $x_0 = x_c$ рішення має вигляд (3.39), і у випадку $x_0 > x_c$ спостерігається необмежене зростання x .

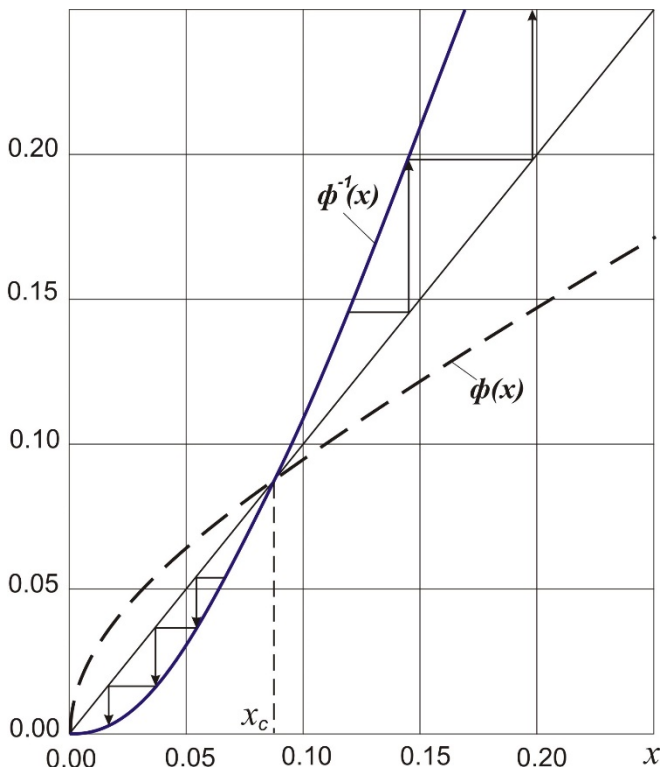


Рис. 3.17. Поведінка ієрархічної системи

В рамках континуального наближення рекурентне співвідношення (3.38) може бути представлено у формі

$$\frac{dx_n}{dn} = \frac{\partial V}{\partial x_n} \quad (3.46)$$

з синергетичним потенціалом

$$V = -\frac{x^2}{2} + \int \phi(x) dx \quad (3.47)$$

Підстановка залежності, визначеною рівністю (3.38), дає

$$V = \frac{Wq}{2-D} x^{2-D} - \frac{1-q}{2} x^2, \quad q = s^{-1/D} \quad (3.48)$$

Як видно з рис. 3.18, потенціал $V(x)$ при докритичних значеннях $x < x_c$, обмежених величиною (3.39), зростає, а потім необмежено спадає. По своїй формі крива $V(x)$ співпадає із залежністю вільної енергії зародку нової фази від його радіусу, де зростання обумовлене поверхневою енергією, а необмежений спад – виграшем термодинамічного потенціалу в результаті перетворення. Таким чином, ієрархічна система нестійка щодо необмеженого наростання числа рівнів, якщо початкове значення інтенсивності x_0 перевищує x_c .

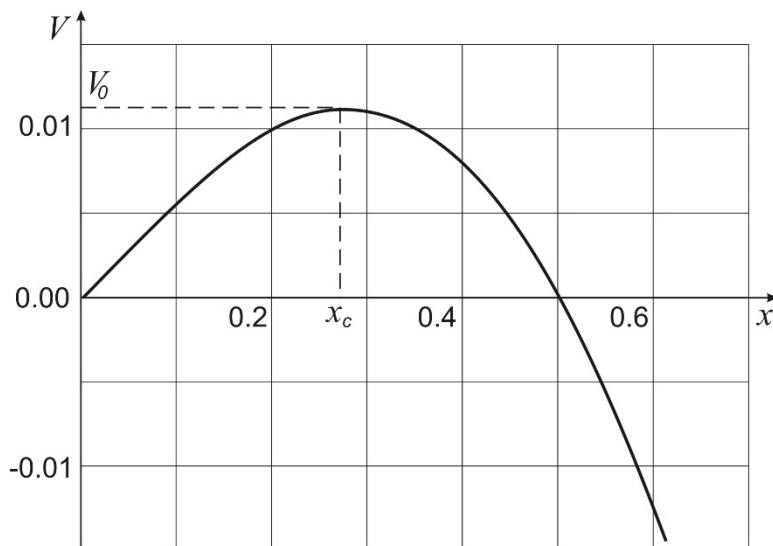


Рис. 3.18. Форма синергетичного потенціалу ієрархічної системи [16]

Ці результати є відомими [16], ми лише стисло відтворили їх тут, щоб показати, що при заданій конфігурації ієрархії важливу роль виконує фрактальність, величина якої визначає силу ієрархічного зв'язку.

Основний результат проведеного аналізу полягає в представленні даного процесу у конфігуративному просторі станів системи фрактальним алгоритмом напрацювання на відмову, як руху по вузлах ієрархічного дерева Кейлі [37]. Граничний сценарій відповідає картині фазового переходу другого роду [16] - елементарні носії активності флуктуаційно по фрактальному алгоритму об'єднуються в мезоскопічні області - осередки руйнування, утворення яких описується ланцюжковим процесом.

Повний опис процесу на основі представлення ієрархічно супідрядного ансамблю дефектів вимагає опису механізму, що зв'яже дефекти на нижніх рівнях в одиночний супердефект на верхньому.

3.4.3. Модель навантаженого фрактального пучка

Прояв принципу масштабної інваріантності при накопиченні пошкодженості [17] дає просту методологічну основу для аналізу процесу, і прояснює фізичне значення параметра, що вводиться.

Фізичну картину представимо у вигляді ієрархічної системи елементів, що є фракталом (дерево Кейлі) (при глибині ієрархії $n=3$, рис.3.19). Елементи системи E^1, E^2, \dots, E^{2^n} розташовані на 0-у рівні і об'єднані попарно в блоки 1-го рівня, пари яких в свою чергу об'єднані в блоки наступного рівня B_2^j і т.д. Блок B_n відповідає системі в цілому $S^{(n)}$. Припустимо, що система, володіючи фрактальною структурою, знаходиться під певною зовнішньою дією. Елементи системи E^j мають початкову випадкову міцність R з безперервним розподілом, заданим на проміжку $[x_{\min}; x_{\max}]$

У початковому стані навантаження q на всі елементи E^j однакове, тому ймовірність їх руйнування також однакова. Руйнування довільного елемента E^1 викликає зміну навантаження в парному елементі E^2 , і нове її значення рівно $g(q)$. При руйнуванні елемента E^2 зруйнованим вважається блок B_1^1 , що приводить до зміни навантажень в елементах E^3, E^4

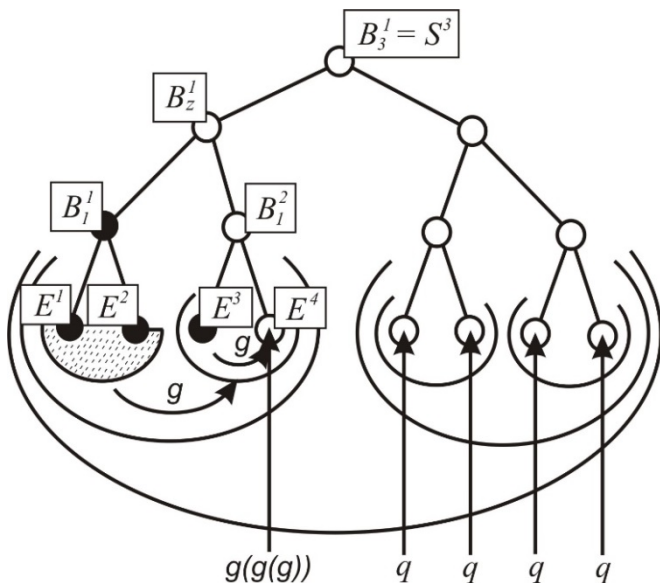


Рис.3.19. Фрактальна схема накопичення пошкоджуваності

То, як відбувається процес руйнування елементів у міру зростання прикладеного зусилля, істотно залежить від ступеня неоднорідності міцності елементів даного блоку. Хай міцність елементів описується функцією розподілу $F_i(x) = P\{R_i < x\}$ - значення функції розподілу міцності даного елемента при аргументі, рівному x (ймовірність цього елемента виявитися переобтяженим при навантаженні x).

В межах кожного блоку, як окремої двоелементної системи, ймовірність руйнування (розподіл міцності) рівна:

$$P(x) = 2F_0(x)F_0(g(x)) - (F_0(x))^2,$$

де $g(x)$ - функція перерозподілу навантажень Q , значення якої рівне зусиллю в незруйнованому елементі пошкодженої системи, якщо зусилля в елементах непошкодженої системи були рівні x .

Розподіл міцності для системи $S^{(n)}$ рівний:

$$F_m(x) = \mathfrak{Z}\{F_{m-1}\}, \quad m = 1, \dots, n$$

де функціональний оператор $\mathfrak{F}\{\cdot\}$, що здійснює послідовне перетворення функцій розподілу міцностей блоків, визначений співвідношенням

$$F_m(x) = 2F_{m-1}(x)F_{m-1}(g(x)) - (F_{m-1}(x))^2 \quad m = 1, \dots, n$$

Тут $F_{m-1}(x)$ функція розподілу міцності блоків B_m^j $j = 1, \dots, 2^{n-m}$.

Асимптотична поведінка функції розподілу виявляє прагнення до деякого граничного розподілу, одним з яких є розподіл Парето, який описує на кривій працездатності критичний стан системи (при $g(x) = ax$).

$$F^s(x) = 1 - \left(\frac{x_{\min}}{x}\right)^\gamma,$$

Проведемо якісний аналіз властивостей функції розподілу $F_n(x)$. Якщо функція розподілу $F_n(x)$ поводить ся таким чином: при $n \rightarrow \infty$ $F_n(x) \rightarrow 1$ для всіх $x > x^*$ і $F_n(x) \rightarrow 0$ для всіх $x < x^*$, то існує асимптотичний поріг міцності x^* . Якщо в навантаженій фрактальній системі формується поріг міцності, то вірогідність її руйнування дуже мала (ризик розвитку аварії малий) при навантаженнях менших критичного значення x^* , і, навпроти, близька до 1 при навантаженнях, що перевищують це критичне значення (рис. 3.20). Причому перебудова структури системи відбувається стрибком – розвивається режим із загостренням. Параметром, що володіє предвісниковими властивостями виникнення і розвитку такого режиму, як було доведено, є параметр пошкодженості.

Розглянемо протікаючий в часі стаціонарний випадковий процес розповсюдження збурень в середовищі. Вважатимемо, що в структурі матеріалу є набір резервних фізичних механізмів, подібно волокнам фрактального пучка, здійснюючих локалізацію збурюючих дій.

То, як відбувається розрив волокон у міру зростання докладеного зусилля, істотно залежить від ступеня неоднорідності пучка. Хай міцність волокон описується функцією розподілу $P(\xi) = \text{Prob}\{s < \xi\}$, тоді пучок містить в середньому $n = N[1 - P(s)]$ волокон міцності не менше S , здатних витримати сумарне зусилля $F = sn$. Таким чином, розрив волокон міцності S наступатиме при досягненні зусиллям значення

$$F(s) = Ns[1 - P(s)]. \quad (3.49)$$

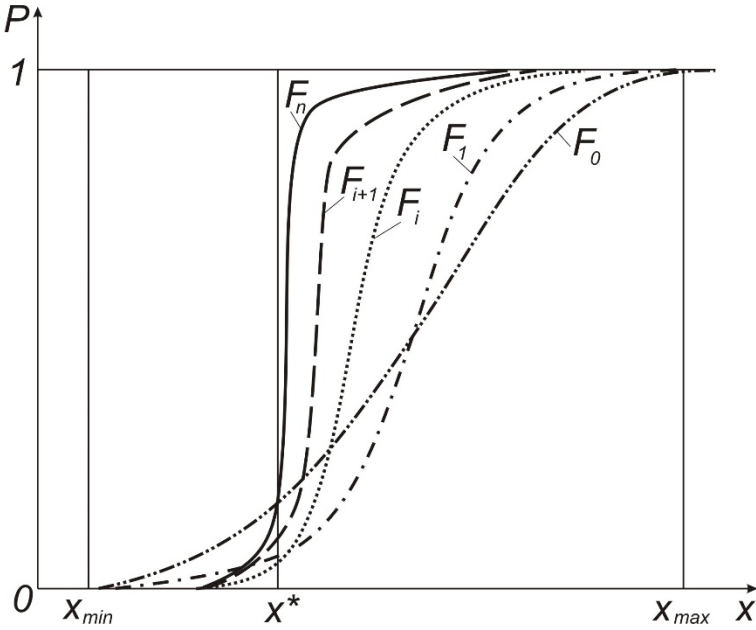


Рис.3.20. Функція розподілу $F_n(x)$ руйнування елементів

Якщо функція розподілу $P(\xi)$ така, що вираз (3.49) має максимум в деякій точці, то поблизу неї значення розриваючого зусилля можна апроксимувати формулою

$$F(s) = F_c - c(s - s_c)^2. \quad (3.50)$$

При цьому необхідна для «виживання» волокна міцність розходиться при $F \rightarrow F_c$ як

$$\frac{ds}{dF} \sim (F_c - F)^{-1/2}, \quad (3.51)$$

тобто F_c є критичною точкою. У її околиці на підвищення докладеного зусилля пучок відповідатиме розривом числа волокон, розподіленого ступеневим чином. І лише після того, як F декілька перевищить F_c , відбудеться розрив всіх волокон, що залишилися – повне руйнування.

Виникнення таких властивостей співвідноситься з "ланцюговою реакцією" пошкодженості, тобто лавиноподібним наростанням збурення із залученням в подію все більшої кількості ресурсу, який витрачається подібно розривам волокон в пучку.

Аналогом ступеня неоднорідності пучка є коефіцієнт варіації визначального параметра. Слід звернути увагу на важливість одержаного результату. Варіація визначального параметра – важлива діагностична ознака в побудові системи реального часу і розробки інструментальних засобів для генерації програмного забезпечення інтелектуальних датчиків по початкових вимогах задач вимірювання і призначених для користувача алгоритмів обробки інформації для вбудовування в систему управління безпекою ОМПН.

Для побудови цього взаємозв'язку необхідний ряд додаткових результатів, які формулюються далі.

3.4.4. Оцінка параметра розподілу часу напрацювання на відмову

Вплив нерівномірності (неоднорідності) зміни закономірної складової $x(t)$ у випадковому процесі $\xi(t)$ враховується її середньквдратичном відхиленням $\sigma(t) = \sqrt{D\xi(t)}$. Час релаксації системи на збурення

$\Delta\xi(t)$ пропорційний відношенню $\frac{\Delta\xi(t)}{\partial\xi(t)/\partial t}$. Швидкість рлаксації про-

порційна зворотній величині $\frac{\partial\xi(t)/\partial t}{\Delta\xi(t)}$ і характеризує інтенсивність

збурюючих дій на систему $\lambda(t)$. Збурюючі дії, накопичення яких зрештою веде до збільшення вірогідності руйнування системи, пов'язано з середнім квадратичним відхиленням $\Delta\xi(t) = z\sigma(t)$. Якщо є можливість статистичного аналізу сукупності з N реалізацій випадкового процесу, то аналіз вибіркового даних по кожному перетину $t = const$ дає статистичну оцінку для збурюючої дії у формі, де коефіцієнт при середньоквдратичносу відхиленні рівний квантілю розподіли Стьюдента із

$N - 1$ ступенями свободи і рівнем значущості $1 - \alpha/2$. При цьому достовірність відповідає рівню $P = 1 - \alpha$. Тобто $z = t_{1-\alpha/2}$ із $N - 1$ ступенями свободи. У результаті для інтенсивності збурюючих дій одержуємо залежність

$$\lambda(t) = \frac{\dot{\xi}(t)}{t_{1-\alpha/2} \cdot \sqrt{D\xi(t)}}.$$

Вірогідність неруйнування протягом часу, що не перевершує t , для системи з рівнем пошкодженості V рівна $P_{np}(t) = (1 - e^{-\lambda(t)t})^V$. Кумулятивні руйнуючі дії пропорційні часу функціонування системи в нормальному режимі.

У результаті надійність рівна

$$F(t) = P_{np}(t) = \left(1 - \exp\left(-\frac{\dot{\xi}(t)}{t_{1-\alpha/2}} \cdot t \right) \right)^V.$$

У околиці нуля ($t \rightarrow 0$) залежність вірогідності неруйнування за час t лінійна від часу і має порядок

$$F \sim v\lambda(t) = v \frac{\dot{\xi}(t)}{\Delta x} = \frac{v}{t_{1-\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{t \cdot \xi}} = \frac{v}{t_{1-\alpha/2} \cdot V_\xi},$$

де V_ξ - коефіцієнт варіації зміни ознаки ξ : $V_\xi = \frac{\sqrt{D\xi(t)}}{M\xi(t)}$. Це узгоджується з фізичним значенням одержаного рівняння. Чим менше коефіцієнт варіації, тим менший у системи рівень накопичених пошкоджень, тим менший ризик відмови. Динамічний моніторинг стану системи покликаний забезпечити можливість фіксації критичного стану системи, при якому

$$\lambda(t) = \frac{\dot{\xi}(t)}{t_{1-\alpha/2} \cdot \sqrt{D\xi(t)}} = \frac{\dot{\xi}(t)}{t_{1-\alpha/2} \cdot M\xi(t) \cdot V(t)} = \frac{\dot{\xi}(t)/M\xi(t)}{t_{1-\alpha/2} \cdot V(t)}.$$

Це дає можливість при змінному значенні інтенсивності збурюючих дій $r(t)$ (параметра потоку відмов, інтенсивності зносу і т.д.) одержати залеж-

ність $r(t) = \frac{1}{t_{1-\alpha/2}} \cdot \frac{\dot{\xi}(t)}{M\xi(t)} \cdot \frac{1}{V(t)}$. Порівнюючи значення для коефіціє-

нта варіації з останнього рівняння і $V = \nu^{1-D}$, одержимо:

$$\nu^{1-D} = \frac{1}{t_{1-\alpha/2}} \cdot \frac{\dot{\xi}(t)}{M\xi(t)} \cdot \frac{1}{r(t)}.$$

Таким чином, доведено, що величина до-

бутку $\nu^{1-D} \cdot r$ постійна і залежить тільки від характеристик динамічної

системи. При цьому $\nu^{1-D} \cdot r = \frac{1}{t_{1-\alpha/2}} \cdot \frac{\dot{\xi}(t)}{M\xi(t)}$.

Знайдемо оцінку параметра розподілу часу напрацювання на від-
мову.

Розглянемо закон розподілу, характерний для часу безвідмовної
роботи τ резервованих систем: $P(t < \tau) = F(t) = (1 - e^{-\lambda t})^V$. Резерві-
рованність в даному випадку мається на увазі у функціональному значенні (вона може бути не цілою величиною).

Для оцінки параметрів (λ, ν) знайдемо моменти розподілу вели-
чини τ – випадкового часу між двома сусідніми відмовами. В цьому ви-

падку функція розподілу задається у вигляді $F = (1 - e^{-\lambda x})^V$, а густина

рівна, відповідно, $F' = \lambda \nu (1 - e^{-\lambda x})^{\nu-1} e^{-\lambda x}$. Тоді

$$\lambda M\tau = \lambda \int_0^{\infty} x d(F(x)) = \lambda \int_0^{\infty} x d(1 - e^{-\lambda x})^V.$$

Для натуральних значень ν :

$$\lambda M\tau = \frac{1}{1} C_\nu^1 - \frac{1}{2} C_\nu^2 + \frac{1}{3} C_\nu^3 + \dots + (-1)^{\nu+1} \frac{1}{\nu} C_\nu^\nu.$$

Тут і надалі знаходження безрозмірної величини $\lambda M\tau$ переважно,
ніж математичного очікування $M\tau$. Аналогічно для моменту другого
порядку при тій же умові, що ν натуральне, одержимо:

$$\lambda^2 M\tau^2 = \lambda^2 \int_0^\infty x^2 d(F(x)) = 2 \left(\frac{C_v^1}{1^2} - \frac{C_v^2}{2^2} + \dots + (-1)^{v+1} \frac{C_v^v}{v^2} \right).$$

Звідси

$$\lambda^2 D\tau = 2 \left(\frac{C_v^1}{1^2} - \frac{C_v^2}{2^2} + \dots + (-1)^{v+1} \frac{C_v^v}{v^2} \right) - \left(\frac{1}{1} C_v^1 - \frac{1}{2} C_v^2 + \frac{1}{3} C_v^3 + \dots + (-1)^{v+1} \frac{1}{v} C_v^v \right)^2$$

Якщо користуватися, наприклад, методом моментів, то для знаходження невідомих параметрів розподілу λ і v задача зводиться до системи трансцендентних рівнянь

$$\begin{cases} \lambda M\tau = \frac{1}{1} C_v^1 - \frac{1}{2} C_v^2 + \frac{1}{3} C_v^3 + \dots + (-1)^{v+1} \frac{1}{v} C_v^v, \\ \lambda^2 D\tau = 2 \left(\frac{C_v^1}{1^2} - \frac{C_v^2}{2^2} + \dots + (-1)^{v+1} \frac{C_v^v}{v^2} \right) - \left(\frac{1}{1} C_v^1 - \frac{1}{2} C_v^2 + \frac{1}{3} C_v^3 + \dots + (-1)^{v+1} \frac{1}{v} C_v^v \right)^2. \end{cases}$$

Необхідно одержати алгоритм обчислень, придатний для довільних речовинних значень v . Використовуючи стандартне позначення для логарифмічної похідної гамма-функції, введемо так звану дигамма-

функцію і її похідні:
$$\psi(v) = \frac{d \ln \Gamma(v)}{dv} = \frac{d}{dv} \int_0^\infty t^{v-1} e^{-t} dt.$$

У цих позначеннях:
$$\frac{(M\tau)^2}{D\tau} = \frac{[\psi(v+1) - \psi(1)]^2}{\psi'(1) - \psi'(v+1)} = E(v),$$
 де C

– постійна Ейлера, рівна $\psi'(1) = \frac{\pi^2}{6}$.

Зокрема, якщо час підкоряється експоненціальному закону

$\tau \sim F(t) = P\{\tau < t\} = 1 - e^{-\lambda t}$, то $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i = M\tau$. Закон, справед-

ливий в загальному випадку $F_v(t) = (1 - e^{-\lambda t})^v$, можна інтерпретувати як

простий потік подій $F_\nu(t) \sim F^* = 1 - e^{-\mu t}$. Тоді приходимо до наступної оцінки параметра μ : $\frac{1}{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \tau_i$. Інтенсивність відмов при цьому зменшується $\mu < \lambda$.

Відношення $\frac{\lambda}{\mu} = z(\nu) > 1$ $\frac{\lambda}{\mu} = z(\nu) > 1$ показує, у скільки разів зменшиться інтенсивність відмов або, що те ж саме, у скільки разів збільшиться середній час безаварійної роботи $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i = M\tau$. Надійність зростає в $z(\nu) = C + \psi(\nu + 1)$ раз. Якщо $\nu = n \in N$, то $z(\nu) = 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}$. Це дуже зручна оцінка з практичної точки зору.

Залишається відкритим питання про те, як при довільних значеннях параметрів λ і ν по вибірці $\{\tau_i\}_{i=1}^n$ і оцінкам $M\tau = \frac{1}{N} \sum_i \tau_i$ і

$D\tau = \frac{1}{N-1} \sum_i (\tau_i - M\tau)^2$ знайти обидва параметри розподілу. Задача кінцею кінцем зводиться до порівняння вибіркової оцінки коефіцієнта варіації з його теоретичним значенням $V(t)$. Дійсно, послідовно знахо-

димо
$$\frac{(M\tau)^2}{D\tau} = \frac{[\psi(\nu+1) - \psi(1)]^2}{\psi'(1) - \psi'(\nu+1)}; \frac{\sqrt{D\tau}}{M\tau} = V,$$

$$V(\nu) = \frac{\sqrt{\psi'(1) - \psi'(\nu+1)}}{\psi(\nu+1) - \psi(1)}.$$

У чисельних оцінках необхідно використовувати рівність:

$$\psi'\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\pi^2}{2}, \quad \psi'(1) = \frac{\pi^2}{6}, \quad \psi'\left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{\pi^2}{2} - 4 \sum_{k=1}^n \frac{1}{(2k-1)^2},$$

$$\psi'(n) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k^2}, \quad \psi\left(\frac{1}{2}\right) = -C - 2 \ln 2, \quad \psi(1) = -C,$$

$$\psi(z+1) = \psi(z) + \frac{1}{z}, \quad \psi(n+1) = -C + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}, \quad n \in \mathbb{N},$$

$$\psi\left(\frac{1}{2} + n\right) = -C - 2 \ln 2 + 2 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{2k+1}; \quad \psi'(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+z)^2};$$

$$\psi(a) = -C + (a-1) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(k+1)(k+a)}; \quad \zeta(2n) = \frac{2^{2n-1} \pi^{2n}}{(2n)!} \cdot |B_{2n}|, \text{ где } B_{2n}$$

– числа Бернуллі.

З їх допомогою можна точно визначити значення $f(v)$ для дробових значень аргументу. Знаходимо, що при $v \rightarrow 0_+$

$$\frac{\psi' - \psi'(v+1)}{-1 + (v+1)} = -\psi'(1) = -(-1)^3 2! \zeta(3) = 2\zeta(3), \quad \text{де}$$

$\zeta(n) = \sum_{k=1}^{\infty} k^{-n}$ – дзета-функція Рімана для цілих n .

З урахуванням того, що

$$\frac{\frac{1}{v} \sqrt{\psi'(1) - \psi'(v+1)}}{\frac{1}{v} [\psi(v+1) - \psi(1)]} = \frac{1}{\sqrt{v}} \frac{\sqrt{\frac{\psi'(v+1) - \psi'(1)}{v}}}{\frac{\psi(v+1) - \psi(1)}{v}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{v}} \cdot \frac{\sqrt{2\zeta(3)}}{\pi^2/6}$$

знайдемо асимптотику для коефіцієнта варіації.

$$\text{При } v \rightarrow \infty, \quad V(v) \underset{v \rightarrow 0}{\sim} \frac{\sqrt{2\zeta(3)}}{\pi^2/6} \cdot \frac{1}{\sqrt{v}}. \quad \text{Оскільки}$$

$$\zeta(3) = 1,2020569031; \quad V = \frac{0,94260343106}{\sqrt{v}}.$$

Для оцінки параметра v переважно як апроксимуючу функцію вибирати дотичну, а не пряму, знайдену за допомогою найменших квадратів. Зада-

ча оцінки v зводиться до рішення рівняння $\frac{\psi'(1) - \psi'(v+1)}{(\psi(v+1) - \psi(1))^2} = V^2$.

Звідси $V(\nu) = \frac{\sqrt{\psi'(1) - \psi'(\nu+1)}}{\psi(\nu+1) - \psi(1)}$, де через $\psi(\nu)$ позначена логарифмічна похідна гамма-функції.

$\psi(1) = -c$, де постійна Ейлера $c = \gamma = 0,577\dots$, а

$$\psi'(1) = (-1)^{1+1} 1! \zeta(2) = \frac{\pi^2}{6}$$

Якщо $\nu = n \in N$, то $V(\nu) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2}} / \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$;

Якщо $\nu = n + \frac{1}{2}, n \in N$,

$$\text{то } V\left(n + \frac{1}{2}\right) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n+1} \frac{1}{(2k-1)^2} - \frac{\pi^2}{12}} / \left(\sum_{k=0}^n \frac{1}{2k+1} - \ln 2\right).$$

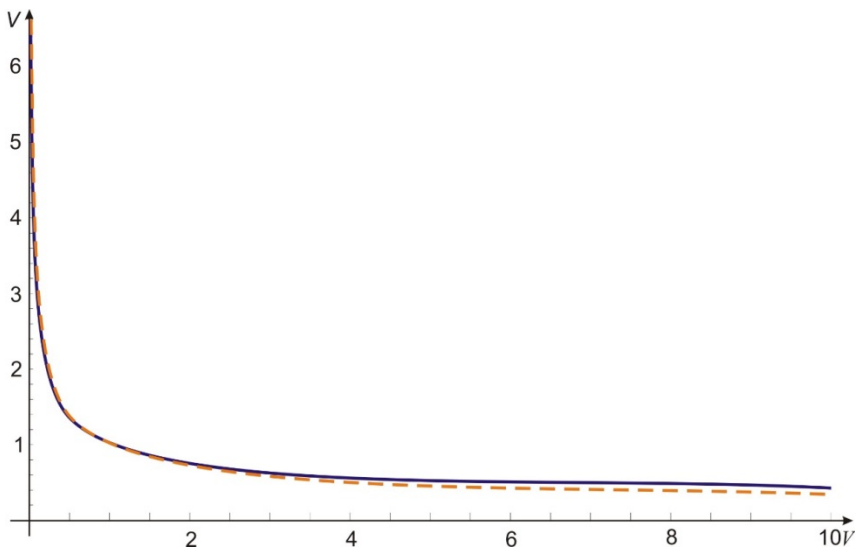


Рис. 3.21. Функція $V(\nu)$ і $\nu(V)$ в координатах ν і V

Графік проходить через точку (1;1), що в логарифмічних координатах обумовлює перехід через початок координат. Це істотно спрощує задачу оцінки показників закону розподілу за статистичними даними. У логарифмічних координатах графік зображений на рис. 3.21. Цей графік нагадує криві Річардсона [13], вперше побудовані ним для випрямлення берегових ліній. Крива $V = V(\nu)$ і $\ln V = \ln V(\ln \nu)$ володіє другою похідною більшою нуля, отже дотична до графіка в точці (0;0) є точною нижньою межею для залежностей $V = V(\nu)$ і $\ln V = \ln V(\ln \nu)$.

Якщо побудувати в координатах $(\ln V, \ln \nu)$ одержану криву, то випрямлення окремих її ділянок дозволить знайти кутовий коефіцієнт лінійного наближення. По його величині можна оцінити фрактальну розмірність складної системи, надійність якої визначає залежність $V(\nu)$ і $\nu(V)$.

Лінійна апроксимація в околиці довільної точки означає не що інше, як заміну функції $V(\nu)$ залежністю $V_D = V_1 \cdot \nu^{1-D}$. Простір алгоритмів, відповідних тій або іншій схемі, час відмов якої утворює аналізовану вибірку, є фракталом з розмірністю D .

$$\text{При } \nu \sim \frac{0,8885}{V^2}; D=1; \text{ При } \nu \rightarrow \infty, V(\nu) \sim \frac{\frac{\pi^2}{6} - \left(\zeta(2) - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \right)}{\ln \nu + C};$$

$$V(\nu) \sim \sqrt{\frac{\frac{\pi^2}{6} - 1}{\ln \nu + C}} \cdot \nu. \text{ Тому при } \nu \rightarrow \infty; V \rightarrow 0; V \sim \frac{\pi^2}{\sqrt{6}} \cdot \frac{1}{\ln \nu};$$

$$\ln \nu \sim \frac{\pi}{V\sqrt{6}}; \nu = e^{\frac{\pi}{V\sqrt{6}}}.$$

Якщо шукати величину $k = 1 - D$ у всьому діапазоні зміни, як таке значення ступеня, яке мінімізує суму квадратів відхилень

$$\sum_i \left(V_i - \frac{1}{V_i^k} \right)^2 = \varphi(k); \varphi(k) = \sum_i (v_i^{-k} - V_i)^2, \text{ то приходимо до}$$

рівняння, де

$$\frac{d\varphi}{dk} = 2 \sum (v_i^{-k} - V_i)^2 (-k v_i^{-k-1} \ln v_i) =$$

$$= -k \cdot 2 \sum_i (v_i^{-k} v_i^{-k-1} \ln v_i - V_i v_i^{-k-1} \ln v_i),$$

,

У околиці точки $\nu = 1$, $\ln V = (1-D) \ln \nu$. Звідси послідовно

одержуємо:
$$\frac{d(\ln V)}{d(\ln \nu)} = 1 - D + o(\ln \nu); \quad 1 - D = (\ln V)' \Big|_{\nu=1};$$

$$1 - D = \frac{1}{2} \cdot \frac{-\psi''(2)}{\psi'(1) - \psi'(2)} - \frac{\psi'(2)}{\psi(2) - \psi(1)};$$

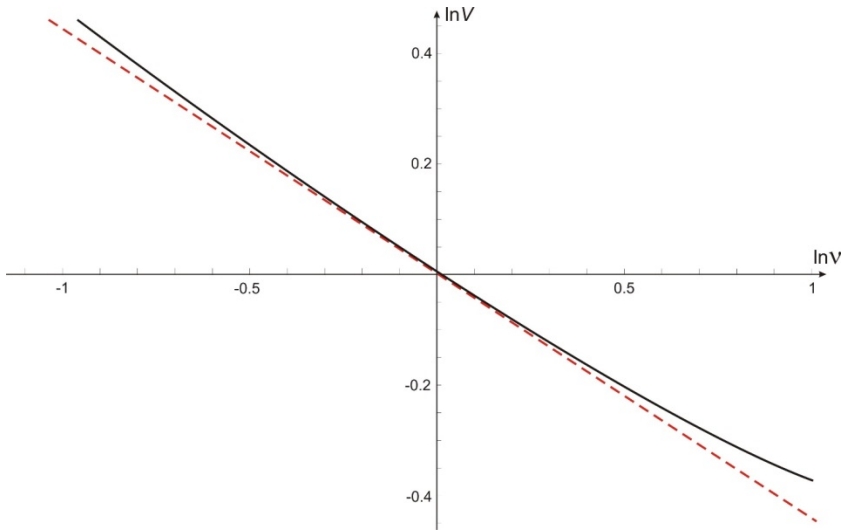


Рис. 3.22. Функція $V(\nu)$ і $\nu(V)$ в подвійних логарифмічних координатах

$$D = 1 + \frac{\pi^2}{6} - \zeta(3) = 1,443. \quad \nu = V^{-2,25796}; \quad \nu = \alpha V^{-\beta}; \quad \alpha_0 = 1;$$

$\beta_0 = 2,25796$; При цих α і β реалізується мінімум функції

$$\varphi(\alpha, \beta) = \sum_i (\alpha V_i^{-\beta} - v_i)^2 \rightarrow \min.$$

Звідси витікає алгоритм знаходження показника ступеня резер-

вугання ν . Знаючи V з експериментальних даних по величині

$$V = \sqrt{D(\tau)} / M\tau \quad \text{послідовно} \quad \text{знаходимо:}$$

$$\lambda^{-1} = \frac{M(\tau)}{\psi(\nu+1) - \psi(1)} = \frac{M(\tau)}{\psi(\nu+1) + C},$$

де $C + \psi(\nu+1) = z(\nu) = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}$. В результаті

$$\text{якщо } \nu = n, \text{ то } V(\nu) = V(n) = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2}}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}};$$

$$\text{якщо } \nu = n + \frac{1}{2}, \text{ де, то } V(\nu) = V\left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n+1} \frac{1}{(2k-1)^2} - \frac{\pi^2}{12}}}{\left(\sum_{k=0}^n \frac{1}{2k+1} - \ln 2\right)}.$$

При інших значеннях ν застосовуються формула

$$V(\nu) = \frac{\sqrt{\psi'(1) - \psi'(\nu+1)}}{\psi(\nu+1) - \psi(1)},$$

$$\text{де } \psi^{(n)}(\nu+1) = \psi^{(n)}(\nu) + \frac{(-1)^n n!}{\nu^{n+1}}.$$

Виразимо ν через, де $\nu = z + 1$:

$$\psi(z+1) = -\gamma + \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^2 \xi(n) z^{n-1},$$

де $z \in (0, 1)$;

$$\psi'(z+1) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^2 (n+1) \xi(n+2) z^n,$$

де $z \in (0, 1)$.

Граничне n одержимо з виразу $(n+1)z^n < \varepsilon$, де ε наперед задана погрішність. $\xi(n)$ знаходиться з виразу

$$\xi(n) = \frac{2^n}{2^n - 2} \left(1 - \frac{1}{2^n} + \frac{1}{3^n} - \frac{1}{4^n} + \dots \right),$$

де кількість членів ряду для будь-якого $n = const$ визначається як $k = E \left[(1/\varepsilon)^{1/n} \right] + 1$.

Таким чином, у реальному часі по спостереженню випадкової величини одержаний алгоритм оцінки параметра, характеризуючого ступінь «функціональної резервованості» (пошкодженості) системи, що дозволяє контролювати безпеку цієї системи.

Одержаний ступеневий закон

$$V \sim v^{-\theta} = v^{1-D} \quad (3.52)$$

є по суті джерелом самоподібності (фрактальності) - масштабної інваріантності механізму накопичення дефектності в системі в критичному стані.

3.4.5. Параметр пошкодженості системи

Відомо, що руйнування є процесом множинного зародження і розвитку мікротріщин: в період розсіяного руйнування аж до появи макротріщин відбувається зародження, рух, зростання і агрегація різного роду дефектів.

Висловимо накопичену експериментальну інформацію в даному контексті у вигляді коротких емпіричних узагальнень.

1. Макроруйнування матеріалу можна розглядати як процес множинного мікроруйнування; виникненню магістральної тріщини передують тривалий період накопичення пошкодженості.

Таким чином, в процесі руйнування каскад мікродефектів росте як самоподібний кластер.

2. Для даної задачі можна побудувати фрактальну інтерпретацію алгоритму накопичення пошкодженості в задачі про періодичну систему тріщин [34].

Класичне кінетичне рівняння Работнова для випадку пошкодженості має вигляд

$$\frac{dw}{dt} = f(P, w) \quad (3.53)$$

де w - параметр пошкодженості матеріалу, t - час, P - навантаження. Звичайно приймається, що матеріал в початковому стані бездефектний, тобто $w|_{t=0} = 0$. Критерій руйнування приймається як умова рівності параметра пошкодженості одиниці: $w|_{t=t_*} = 1$.

Конкретний вид функції f в співвідношенні (3.53) вибирається виключно з міркувань якнайкращого опису конкретних експериментальних даних за допомогою набору визначальних параметрів: навантаження, температури, деформації і т.д. Але значення кінетичного рівняння пошкодженості тісно пов'язане з одним із фундаментальних законів фізики – законом збереження маси.

Розглянемо схильний до рівномірного розтягування однорідний зразок і виділимо в його середній частині деякий матеріальний об'єм. Позначимо масу об'єму через m , а його величину до деформації – через V_0 . Припустимо, що в результаті додатку до зразка навантаження у виділеному матеріальному об'ємі сформувалися мікропошкодження (мікротріщини) сумарним об'ємом V_* , за рахунок чого до даного моменту часу відбулася деформація зразка. Таким чином, V_* визначає ступінь розпушування матеріалу. Після додатку навантаження величина матеріального об'єму стає рівною $V = V_0 + V_*$. В результаті утворення мікропошкоджень відбувається зміна локальної густини. Випишемо закон збереження маси [33]

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = -\text{div } v. \quad (3.54)$$

Тут v - швидкість руху частинок матеріалу. Введемо поточну локальну густину [33] $\rho = \frac{dm}{dV} = \frac{dm}{dV_0} \frac{dV_0}{dV} = \frac{dm}{dV_0} \left(1 - \frac{dV_*}{dV} \right)$.

Хай $\rho_0 = \frac{dm}{dV_0}$ - густина матеріалу до деформації, $w = \frac{dV_*}{dV}$ -

безрозмірний параметр, який характеризує відносний об'єм пошкоджень, що накопичилися в тілі, і є параметром повреждаємості матеріалу. Тоді поточна локальна густина може бути виражена як [33]

$$\rho = \rho_0(1 - w) \quad (3.55)$$

Підставивши (3.55) в (3.54), одержимо [33]

$$\frac{dW}{dt} = (1 - w) \operatorname{div} v \quad (3.56)$$

Таким чином, кінетичне рівняння (3.53) – це не що інше, як закон збереження маси, записаний в термінах параметра пошкоженості. Розкладаючи $\operatorname{div} v$ в ряд по ступенях w

$$\operatorname{div} v = c_0 + c_1 w + c_2 w^2 + \dots \quad (3.57)$$

і припускаючи відсутність швидкості об'ємного розширення матеріалу у відсутність пошкоженості, $\operatorname{div} v|_{w=0} = 0$, тобто, маємо [33]

$$\frac{dw}{dt} = cw(1 - w) \quad (3.58)$$

Це рівняння в синергетиці використовується для різних дифузійних моделей [22, 33].

При цьому параметр w може розглядатися як характеристика переходу від непошкодженого стану до стану повного руйнування.

Розглянемо рівняння енергетичного балансу Гріффітса [22]. Хай пружна площина розтягується на нескінченності рівномірним навантаженням величини p уздовж осі y . Під дією цього навантаження по всій осі x утворюється поверхня руйнування, що є набором мікротріщин. Її можна змоделювати періодичною системою тріщин [34] (рис. 3.23). Через симетрію задачі можна розглядати руйнування усередині довільної довший широкій смуги - $d_* / 2 \leq x \leq d_* / 2$

Хай довжина однієї тріщини рівна $2l$, період системи - d_0 і в дану смугу потрапило N тріщин сумарною довжиною $2lN$. Тоді неважко бачити, що

$$Nd_0 = d_* \quad (3.59)$$

і середня напруга, діюча усередині смуги при даному навантаженні p ,

$$\sigma_{cp} = \frac{pd_*}{d_* - 2lN}. \quad (3.60)$$

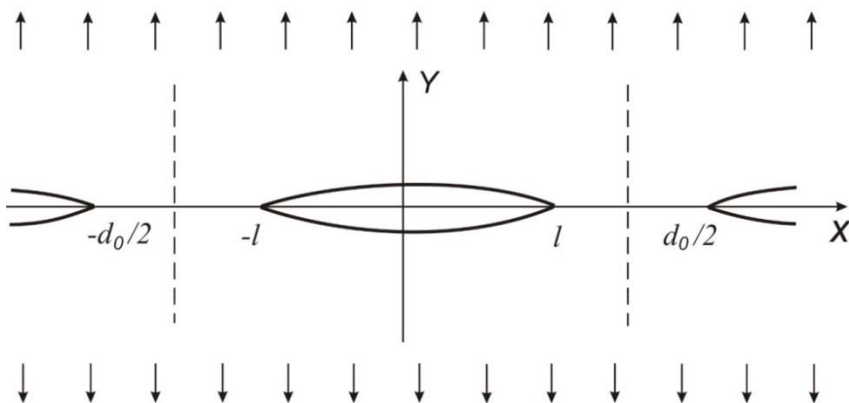


Рис. 3.23. Фрактальна інтерпретація параметру пошкоджуваності періодичною системою тріщин.

Ввівши позначення

$$w = \frac{2l}{d_0}, \quad (3.61)$$

одержимо $\sigma_{cp} = p/(1 - w)$. Очевидно, що повне руйнування відбудеться, коли мікротріщина (сукупність тріщин періодичної системи) займе всю ширину цієї смуги, а σ_{cp} звернеться в нескінченність. Іншими словами, при $w = 0$ - матеріал бездефектний, при розвитку руйнування w росте за рахунок збільшення числа періодів N усередині смуги і одноча-

сного збільшення відносних довжин тріщин $2l/d_0$ усередині цих періодів. Потім, коли w близько до одиниці, маленькі тріщини починають об'єднуватися, тобто кількість періодів при великих w убуває, а при $w = 1$ відбувається розрив смуги – це і є критерій руйнування. Т.ч., величина, визначувана формулою (3.61), може бути інтерпретована як параметр пошкоджуваності [6].

Відповідно до [35] довжина фрактальної тріщини усередині смуги $d_*/2 \leq x \leq d_*/2$ рівна

$$L = (d_*/d)^D d \quad (3.62)$$

де d - масштаб вимірювання довжини. Для кожного рівня навантаження вона повинна співпадати з сумарною довжиною тріщин періодичної системи усередині даної смуги. Тобто $2lN = L$, тоді з (3.59), (3.61) і (3.62) витікає, що

$$w = \frac{2l}{d_0} = \left(\frac{d}{d_*} \right)^{1-D} \quad (3.63)$$

Показник ступеня $(1 - D)$ у (3.63) характеризує рівень пошкоджень, що накопичилися, в системі.

Порівняння (3.63) з (3.52) дає фізичне значення показника ступеня пошкодженості в правій частині (3.63), як параметра пошкодженості, безпосередньо пов'язаного з фрактальною розмірністю, що відкриває нові перспективи для побудови методу контролю критичного стану матеріалу.

Висновки до розділу 3

1. В основі методологічного підходу до дослідження безпеки експлуатації відповідальних металоконструкцій лежить синтез нелінійної динаміки і фрактальної топології, які пов'язують воедино динамічні і геометричні характеристики процесу деградації структури системи. При цьому перехід до стану ризику є складним компромісом між механізмами самоорганізації, визначаючими тенденції еволюційних процесів в системі, і ефектами динамічної релаксації, що відображають роль дисипативних чинників в середовищі, що дозволяє представити механізм

напрацювання на відмову схемою гомеостазиса, що відображає загальну феноменологію явища з урахуванням фізичних процесів, які роблять кардинальний вплив на реалізацію конкретного сценарію еволюції системи.

2. На основі фізичної мезомеханіки, як калібрувальної теорії, задача моделювання пошкодженості сформульована як польова. Дослідження системи в польовому уявленні, з математичної точки зору, що є з точністю до фізичної інтерпретації заміни змінних адекватно опису спостережуваних закономірностей поведінки матеріалу на порозі руйнування, показало, що траєкторії інваріантних множин можуть утворювати гомоклінічні орбіти, коли параметри належать деяким біфуркаційним множинам.

3. Розкрито інформаційні властивості параметра пошкодженості на основі залучення в теоретичну схему аналізу концепції потенційного рельєфу, що перебудовується. Показано, що дані закономірності відображають універсальні механізми фазового переходу.

4. На основі дослідження (з аналізом фрактальної розмірності) основних закономірностей в процесі формування каналу атракції динамічної системи розвинений метод оцінки пошкодженості по характеристиках опису ймовірності релаксації збурень в навантаженому фрактальному пучку. Аналогом ступеня неоднорідності фрактального пучка є коефіцієнт варіації діагностичної ознаки, що формує основу для дослідження і розробки методів і алгоритмів обробки інформації з позицій оцінювання параметрів і прогнозування технічного стану металоконструкцій.

Перелік посилань до розділу 3

1. Ахиезер А.И. Поля и фундаментальные взаимодействия / Ахиезер А.И., Пелетминский С.В. - Киев: Наукова думка, 1986.
2. Баренблатт Г.И. Модель нелокального накопления повреждений / Баренблатт Г.И. // Физ. мезомех, 2003. - Т. 6. - № 4. - С. 85-92.
3. Барзилович Е.Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию / Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. - М.: Транспорт, 1981. – 197 с.
4. Батисс Ф. Автоматическая идентификация подвижного состава / Ф. Батисс. // Железные дороги мира, 1997. - № 2. - С. 53-57.
5. Внук М.П. Неустойчивость на ранних стадиях вязкого разрушения / Внук М.П. //Физ. Мезомех, 2005. – Т.5. - №8. – С. 91-102.
6. Воробьев В.Г. Технические средства и методы обеспечения безопасности полётов / Воробьев В.Г., Зубков Б.В. и др. - М.: Транспорт, 1980. – 149 с.
7. Головин Ю.И. Новые принципы, техника и результаты исследования дина-

- мических характеристик твердых тел в микрообъемах / Головин Ю.И., Тюрин А.И. // ЖТФ, 2000. - Т.70. - Вып.5. – С. 82-91.
8. Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах / Заславский Г.М. – М-Ижевск: Ин-т комп. Исслед., 2004. – 288 с.
 9. Иванова В.С. Разрушение металлов / В.Иванова. – М.: Металлургия. - 1979. - 168 с.
 10. Информационные технологии на железнодорожном транспорте / Под ред. Э.К. Лецкого. - М.: УМК МПС России, 2001. - 668 с.
 11. Йошида С. Интерпретация мезомеханических характеристик пластической деформации на основе аналогии с теорией электромагнитного поля Максвелла / С. Йошида // Физ. Мезомех, 2001. - Т. 4. - № 3. - С. 29-34.
 12. Коллегаев Р.Н. Экономическая оценка качества и оптимизация системы ремонта машин / Р. Коллегаев - М.: Машиностроение, 1980. - 239 с.
 13. Колмогоров А. Н. Новый инвариант для транзитивных динамических систем / А. Н. Колмогоров. // Доклады АН СССР 119, 861, 1958.
 14. Лоскутов А.Ю. Основы теории сложных систем / Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. – М.-Ижевск: Ин-ткомп. Исслед, 2007. – 620 с.
 15. Методы решения задач математического программирования и оптимального управления / Под ред. Меренкова А.П. - Новосибирск: Наука, 1984. - 233 с.
 16. Михлин В.М. Техническая диагностика тракторов и зерноуборочных комбайнов / Михлин В.М., Скибневский К.Ю., Сельцер А.А., Костенко С.И. - М.: Колос, 1988. -285с.
 17. Мозгалевский А.В. Техническая диагностика / Мозгалевский А.В., Гаскаров Д.В. - М.: Высшая школа, 1975. – 201 с.
 18. Мотовилов К.В. Важный фактор обеспечения безопасности движения / Мотовилов К.В., Анисимов П.С., Мисевич В.Н., Гусев М.И. // Железнодорожный транспорт, 1994. - № 10. - С. 35-38.
 19. Надёжность и эффективность в технике: справочник / В.В. Ключев, П.П. Пархоменко и др. - М.: Машиностроение, 1987. - Т9: Техническая шагностика. – 1987. – 339 с.
 20. Найденов В.С. Нормативные основы организации труда / Найденов В.С., Зейфман М.М. - Киев: Технжа, 1987. - 127 с.
 21. 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.
 22. Научная организация труда в промышленности: Учеб.- нагляд. пособие. - М: Экономика, 1980. - 230 с.
 23. Научная организация труда в управлении производственным коллективом: Общеотраслевые науч.-метод. рекомендации / Г.Э. Слезингер, Т.А. Колева, О.М. Богданова и др. - М.: Экономика, 1987. - 317 с.
 24. Научная организация труда и управления производством на предприятиях отрасли: Сборник. - М.: НИИинформтяжмаш, 1975. - 31с.

25. Научная организация труда, производства и управления. - М.: ЦНИИТЭИ-тяжмаш, 1983. - 20 с.
26. Никитин В.А. Управление качеством на базе стандартов ИСО 9000: 2000 / Никитин В.А., Филончева В.В. – СПб.: Питер, 2004. – 127с.
27. Олемской А.И. Синергетика пластической деформации / Олемской А.И., Хоменко А.В. // УФМ, 2001. – Т.2. - №3. – С. 189-264.
28. Острейковский В. А. Теория надежности / Острейковский В. А. — М.: Высшая школа, 2003.
29. Пайтген Х. О. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Пайтген Х. О., Рихтер И.Х. - М.: Мир, 1993. - 176 с.
30. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л.С. и др. - М.: Физматгиз, 1961. - 218 с.
31. Пригожин И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой / Пригожин И., Стенгерс И. - М.: УРСС, 2003. - 431 с.
32. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / Пригожин И., Кондепуди Д. - М.: Мир, 2002. - 461 с.
33. Пригожин И. Человек перед лицом неопределенности / Пригожин И. - Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. - 304 с.
34. Проблема эффективности в современной науке / Под ред. А.Д.Урсула. - Кишинев, 1985. - 256 с.
35. Решетов Д.Н. Надёжность машин / Решетов Д.Н., Иванов А.С. - М.: Высшая школа, 1988. – 235 с.
36. Ридель Э.Э. Определение рационального периода между плановыми ремонтами при постепенных отказах простого объекта / Э.Ридель // Сб. научн. тр. ВЗИИТ, М.: ВЗИИТ, 1977. - Вып. 92. - С.58-73.
37. Саакян Д.Н. Система показателей комплексной оценки мобильных машин / Д.Саакян - М.: Машиностроение, 1988. – 407 с.
38. Селиванов Л. И. Основы теории старения машин / Л. Селиванов - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1971. - 408 с.
39. Серьёзное А.Н. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте / Серьёзное А.Н., Шашурин А.К. - М.: МАИ, 1990. – 194 с.
40. Солодка М.С. К единству социального и технического: проблемы и тенденции развития научных подходов к управлению / Солодка М.С. - Оренбург, 1997. - 208 с.
41. Стрекопытов В.В. Определение периодичности и объемов ремонта машин на основании данных о надежности их узлов / Стрекопытов В.В., Пойлов Л.К. // Сб.научн. тр. УЛИИЖТ. - Л.: УЛИИЖТ, 1970. - Вып. 306. - С.93-95.
42. Теория прогнозирования и принятия решений / Под ред. Саркисяна С.А. - М.: Высшая школа, 1977. - 349 с.
43. Технические средства диагностирования: справочник / В.В. Ключев и др. - М.: Машиностроение, 1989. – 680 с.

44. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам / Хакен Г. - М.: Мир, 1991. - 240 с.
45. Чукбар К. В. Стохастический перенос и дробные производные / К. В. Чукбар. - ЖЭТФ 108, 1875, 1995.
46. Hausdorff F. Dimension und äußeres Maß / F. Hausdorff. - Math. Annalen 79, 157 (1919).
47. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature / B. Mandelbrot. - San Francisco: W.H. Freeman, 1982. - 460 p

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Розділ 1. УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ’ЄКТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ	9
1.1. Принципи призначення стратегії управління ризиками при експлуатації ОМПН	9
1.1.1. Стратегія управління ризиком	9
1.1.2. Принципи планування і підтвердження безпеки	14
1.1.3. Нечітко-ймовірнісна метрика ризику	17
1.2. Процедури реалізації процесу управління ризиком	23
1.2.1. Процедура «постановка задачі»	23
1.2.2. Процедура «ідентифікація ризику»	25
1.2.3. Процедура «аналіз ризику»	31
1.2.4. Процедура «оцінка ризику»	32
1.2.5. Процедура «обробка ризику»	36
1.3. Принципи і процедури наповнення інформацією структурних компонентів інформаційного відображення об’єкту експлуатації	40
1.3.1. Принципи створення системи наукового моніторингу ризиків ОМПН	41
1.3.2. Експериментальний стенд системи наукового моніторингу ризику	43
1.3.3. Система контролю і управління якістю як засіб підвищення безпеки ОМПН	44
Висновки до розділу 1	47
Перелік посилань до розділу 1	49
Розділ 2. ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС МОДЕЛЕЙ ПРИЗНАЧЕННЯ СТРАТЕГІЙ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОМПН В МЕЖАХ ВИМОГ КОНЦЕПЦІЇ УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ	55
2.1. Процедури й елементи системного аналізу процесів управління безпекою ОМПН	55
2.1.1. Опис загальної моделі технічної експлуатації металоконструкцій з урахуванням концепції ризику	56

2.1.2. Формалізований опис моделей призначення стратегій ТОіР в межах вимог концепції управління ризиком.....	69
2.2. Забезпечення показників безвідмовності за критерієм ризиків очікуваних втрат.....	72
2.2.1. Побудова математичної моделі експлуатації ОМПН, що мінімізують ризик збитку.....	73
2.2.2. Розробка стратегії прогнозуючого контролю при управлінні ризиками.....	75
2.2.3. Порівняльна оцінка стратегії управління ризиком.....	94
2.3. Формування процедури контролю при експлуатації ОМПН.....	100
Висновки до розділу 2.....	102
Перелік посилань до розділу 2.....	104

Розділ 3. ОБУМОВЛЕНІСТЬ ДИНАМІЧНИХ

НЕСТАБІЛЬНОСТЕЙ ПРОСТОРОВИХ І ЧАСОВИХ ЕФЕКТІВ РИЗИКУ.....	109
3.1. Визначення головного системоутворюючого чинника.....	109
3.1.1. Формалізація процесу пошкодженості схемою гомеостазису.....	110
3.1.2. Перехід від феноменологічної моделі до фізичних уявлень щодо зміни структури системи.....	117
3.2. Встановлення якісної визначеності системи.....	123
3.2.1. Вибір методологічної схеми.....	124
3.2.2. Еквівалентна картина у фізичній мезомеханіці.....	126
3.2.3. Побудова еволюційної польової моделі.....	129
3.3. Визначення особливостей поведінки системи.....	135
3.4. Вивчення структури системи як єдності компонентів і зв'язків.....	141
3.4.1. Універсальна обумовленість фрактальної топології процесу пошкодженості.....	142
3.4.2. Дослідження колективних ефектів, що визначають критичний стан системи.....	144
3.4.3. Модель навантаженого фрактального пучка.....	150
3.4.4. Оцінка параметра розподілу часу напрацювання на відмову.....	154
3.4.5. Параметр пошкодженості системи.....	164
Висновки до розділу 3.....	168
Перелік посилань до розділу 3.....	169

Наукове видання

МАРЧЕНКО Дмитро Миколайович
ЖИДКОВ Андрій Борисович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ
ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ
ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Монографія

Друкується в авторській редакції

Оригінал-макет Могильна О.В.

Підписано до друку 20.01.2017.
Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір типогр. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 10,11. Обл.-вид. арк.11,8.
Тираж 100 екз. Вид. № 3095. 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. Северодонецьк, 93400, Україна
e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com.