

Бобирь Д. В., Капіца М. І.,

Очкасов О. Б., Рибалка Р. В.

НАДІЙНІСТЬ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА

Том 1

НАДІЙНІСТЬ РУХОМОГО СКЛАДУ



ДНІПРО
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Д. В. Бобирь, М. І. Капіца,
О. Б. Очкасов, Р. В. Рибалка

Надійність та технічна діагностика

ПІДРУЧНИК
У ДВОХ ТОМАХ

Том І
Надійність рухомого складу

ДНІПРО
2026

УДК 629.42-192(075.8)

Н 17

Авторський колектив:

Бобирь Д. В., Капіца М. І., Очкасов О. Б., Рибалка Р. В.

Рекомендовано вченою радою УДУНТ

Протокол № 9 від «1» квітня 2026 р.

Н 17 Надійність та технічна діагностика : підручник : у 2-х т. / Д. В. Бобирь, М. І. Капіца, О. Б. Очкасов, Р. В. Рибалка ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2026. – Т. I : Надійність рухомого складу. – 572 с.

ISBN 978-617-8314-97-2 (PDF)

У підручнику викладено теоретичні та практичні основи надійності та технічної діагностики рухомого складу залізниць. Розглянуто види відмов, параметри надійності, сучасні методи діагностування технічного стану та прогнозування ресурсу елементів і систем.

У Т. 1 підручника розглянуто теоретичні основи надійності рухомого складу залізниць. Матеріал підручника ілюстровано прикладами з практики, типовими задачами та графічними поясненнями моделей.

Видання призначене для студентів закладів вищої освіти залізничного профілю, магістрантів, аспірантів, інженерів та науковців, які спеціалізуються в галузі експлуатації, обслуговування й діагностики рухомого складу.

Призначений для опанування навчальної дисципліни «Надійність та технічна діагностика» зі спеціальності «Залізничний транспорт».

Іл. 138, табл. 40, бібліогр. 7 назв.

УДК 629.42-192(075.8)



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons
[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)
(«Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна)

Зміст

СКОРОЧЕННЯ	7
Вступ.....	8
ГЛАВА 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС І ПРОБЛЕМА НАДІЙНОСТІ ТЕХНІКИ.....	11
1.1. Зростання значення надійності під час НТП	11
1.2. Техніко-економічні втрати, спричинені зниженням надійності.....	17
1.3. Надійність як складова якості технічних об'єктів.....	19
1.4. Короткі відомості з історії розвитку науки про надійність	25
1.5. Методологія дослідження надійності	33
1.6. Підходи до розрахунків надійності.....	35
ГЛАВА 2. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ ІМОВІРНОСТЕЙ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ.....	42
2.1. Загальна характеристика теорії імовірностей і математичної статистики, їхньої ролі в наукових дослідженнях	42
2.2. Основні поняття й терміни теорії імовірностей	44
2.3. Основні теореми теорії імовірностей.....	47
2.4. Розподіли випадкових величин	55
2.5. Числові характеристики розподілів імовірностей випадкових величин.....	65
2.6. Короткі відомості про статистичні методи опрацювання експериментальних даних.....	69
ГЛАВА 3. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ.....	80
3.1. Класифікація процесів зміни властивостей матеріалів і працездатності елементів	80
3.2. Закономірності фізико-хімічних процесів у матеріалах елементів і процесів механічного руйнування твердих тіл	84
3.3. Процеси електричного руйнування твердих діелектриків і напівпровідників.....	95
3.4. Старіння матеріалів.....	99

ГЛАВА 4.	ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РУХОМОГО СКЛАДУ	106
4.1.	Принципи вибору показників надійності	106
4.2.	Фактори, що впливають на вибір показників надійності рухомого складу	108
4.3.	Рухомий склад як об'єкт вивчення надійності: стани, події, властивості.....	110
4.4.	Загальна характеристика показників надійності рухомого складу	134
ГЛАВА 5.	БЕЗВІДМОВНІСТЬ РУХОМОГО СКЛАДУ	141
5.1.	Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів	141
5.2.	Показники безвідмовності відновлюваних об'єктів	169
5.3.	Взаємозв'язок між показниками безвідмовності.....	177
5.4.	Основне рівняння надійності для невідновлюваних об'єктів	189
ГЛАВА 6.	РЕМОНТОПРИДАТНІСТЬ РУХОМОГО СКЛАДУ	199
6.1.	Ремонтопридатність як одна з найважливіших властивостей технічних об'єктів	199
6.2.	Поняття і термінологія в сфері ремонтопридатності технічних об'єктів.....	201
6.3.	Ремонтопридатність як складова якості та ефективності експлуатації.....	205
6.4.	Аналіз чинників, що впливають на ремонтопридатність технічних об'єктів	207
6.5.	Показники ремонтпридатності	219
ГЛАВА 7.	ЗБЕРЕЖУВАНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	236
7.1.	Показники збережуваності.....	236
7.2.	Кількісні показники довговічності.....	238
ГЛАВА 8.	КОМПЛЕКСНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ	247
8.1.	Визначення комплексних показників за статистичними даними	247
8.2.	Основи теорії марковських процесів	252
8.3.	Перетворення Лапласа.....	263
8.4.	Надійність об'єктів із двома можливими станами – схема «відмова-відновлення»	265

8.5. Математична модель процесу функціонування локомотива.....	273
ГЛАВА 9. МОДЕЛІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ	286
9.1. Характер виникнення відмов рухомого складу	286
9.2. Види моделей відмов та вимоги до них.....	289
9.3. Моделі раптових відмов	294
9.4. Аналіз закономірностей, що описують процеси зношування, старіння і втомного пошкодження деталей і вузлів рухомого складу	299
9.5. Основні закони розподілу наробітку до відмови, що використовуються в теорії надійності	303
9.6. Поняття про параметричну надійність	337
9.7. Імовірісно-фізичні моделі відмов.....	342
9.8. Вибір моделі відмов.....	363
ГЛАВА 10. РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ РУХОМОГО СКЛАДУ, ЙОГО ВУЗЛІВ ТА ДЕТАЛЕЙ.....	378
10.1. Загальні положення з розрахунку структурної надійності	378
10.2. Визначення показників безвідмовності за різні схеми з'єднання елементів у системі	385
10.3. Визначення показників безвідмовності резервованих систем.....	391
10.4. Застосування марковських процесів під час розрахунку структурної надійності	400
10.5. Застосування логіко-імовірнісних методів розрахунку надійності систем	408
ГЛАВА 11. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ.....	424
11.1. Види випробувань на надійність.....	431
11.2. Етапи випробувань на надійність	441
11.3. Вибір плану випробувань на надійність	443
11.4. Планування випробувань на надійність	457
11.5. Вимоги до інформації про надійність, методи її збирання та аналізу.....	467
11.6. Визначення показників надійності за результатами спостережень.....	481

ГЛАВА 12. ОСНОВНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ	
РУХОМОГО СКЛАДУ	533
12.1. Конструкційні та схемні шляхи підвищення	
надійності рухомого складу.....	533
12.2. Технологічні шляхи підвищення надійності	
рухомого складу.....	539
12.3. Експлуатаційні шляхи підвищення надійності	
рухомого складу.....	560
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	566
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	567

СКОРОЧЕННЯ

АТ	— акціонерне товариство
ВЦ	— випробувальний центр
ДВЗ	— двигун (двигуни) внутрішнього згоряння
ЗІП	— запасні частини, інструменти та приладдя
ККД	— коефіцієнт корисної дії
НР	— неплановий ремонт
НТД	— нормативно-технічна документація
НТП	— науково-технічний прогрес
ПАР	— поверхнево-активна (адсорбційно-активна) речовина
ПР	— поточний ремонт
РС	— рухомий склад
СКВ	— середньоквадратичне відхилення
ТЗ	— технічне завдання
ТО	— технічне обслуговування
ТО	— технічний об'єкт (технічні об'єкти)
ТУ	— технічні умови
ЕК	— елементарний компонент

Вступ

Залізничний транспорт традиційно займає провідне місце у системі вантажних і пасажирських перевезень України. Його стабільне функціонування є визначальним чинником соціально-економічного розвитку держави, інтеграції регіонів та забезпечення ефективного міжнародного транспортного сполучення. В умовах зростання обсягів перевезень, підвищення навантаження на інфраструктуру та посилення вимог до безпеки й економічності роботи залізниць підвищується роль забезпечення надійності й розвитку сучасних систем технічного діагностування рухомого складу.

Надійність – одна з ключових експлуатаційних властивостей залізничної техніки, що визначає її здатність до тривалої, безвідмовної роботи та раціонального використання ресурсу. Це поняття охоплює комплекс характеристик: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережуваність конструкцій та вузлів. Порушення надійності призводить до зростання витрат на ремонт і обслуговування, ризику порушень графіка руху, виникнення аварійних ситуацій, втрати пропускнуої спроможності та зниження рівня транспортного сервісу.

Технічна діагностика забезпечує своєчасне виявлення дефектів, оцінювання технічного стану та прогнозування ресурсу рухомого складу. Використання комплексу методів – від традиційного контролю до інтелектуальних систем моніторингу, що працюють у реальному часі – дозволяє виявляти відхилення на ранніх стадіях та запобігати відмовам, не зупиняючи рух поїздів.

Історичний розвиток теорії надійності та діагностики в Україні пройшов кілька етапів. У 1960–1980-х роках експлуатація тепловозів 2ТЕ116, ТЕП70, а згодом електровозів ЧС2, ЧС4, ЧС7 і вітчизняних ДЕ1 та ДС3 сприяла накопиченню досвіду оцінювання стану силових агрегатів, гальмівного обладнання, систем охолодження, тягових двигунів та струмоприймачів. У ХХІ столітті парк рухомого складу оновився локомотивами Skoda, GE TE33AC, пасажирськими вагонами нового покоління та вантажними вагонами з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Нові конструкції оснащуються комплексами датчиків температури букс,

навантаження на візки та параметрів силових установок, що дозволяє здійснювати їх моніторинг безперервно та дистанційно.

Перехід від планово-попереджувальної системи обслуговування до станоорієнтованої потребує цифрових інструментів, машинного навчання та обробки великих масивів технічних даних. Це підвищує точність діагностування, зменшує витрати на утримання рухомого складу й продовжує життєвий цикл техніки.

Теорія надійності сформувалася як наукова основа для створення та експлуатації високонадійних технічних систем. Вона поєднує математичні методи, конструкторські рішення та технології підвищення надійності. У її межах сформувався окремий напрям – надійність рухомого складу залізниць, дослідженню якого присвячено цей підручник. Рухомий склад є складною механічною або електромеханічною системою з різнорідними матеріалами, тривалим ресурсом служби та високою інтенсивністю використання. Вантажний вагонний парк експлуатується знеособлено, може працювати за межами України, а відмова окремої одиниці в складі поїзда здатна зупинити рух на напрямку та створити загрозу безпеці. Це визначає необхідність системного розуміння механізмів відмов, методів діагностування та прогнозування ресурсу.

Таким чином, забезпечення надійності рухомого складу та розвиток ефективних систем технічної діагностики є міждисциплінарним завданням, що охоплює галузі інженерії, інформаційних технологій, експлуатаційної логістики та організації ремонтного процесу.

Навчальна дисципліна «Надійність та технічна діагностика» займає ключове місце у підготовці фахівців, здатних розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, пов'язані з конструюванням, експлуатацією, ремонтом, модернізацією та утилізацією рухомого складу залізниць. Вона формує у майбутніх інженерів комплексні знання та практичні навички у сфері забезпечення надійності та технічного стану залізничної техніки, що є критично важливими для безпечної, ефективної та економічної роботи транспортної системи.

Опанування дисципліни дозволяє фахівцям:

- оцінювати та прогнозувати надійність і довговічність рухомого складу на всіх етапах його життєвого циклу;
- впроваджувати сучасні методи технічної діагностики для своєчасного виявлення дефектів і попередження відмов;
- приймати обґрунтовані рішення щодо ремонту, модернізації чи списання об'єктів рухомого складу;
- розробляти заходи з підвищення ефективності експлуатації та ремонту рухомого складу;

– забезпечувати відповідність технічного стану рухомого складу вимогам стандартів безпеки, екологічності та економічності.

Таким чином, дисципліна безпосередньо сприяє формуванню компетентностей, необхідних для вирішення професійних завдань у реальних умовах експлуатації залізничного транспорту.

Для студентів цей курс – не лише сукупність визначень і формул. Це інструмент професійної самореалізації. Той, хто вміє оцінити стан техніки, передбачити її відмову, оптимізувати ремонт чи запропонувати технічне рішення, фактично керує надійністю всієї транспортної системи. Знання, отримані під час вивчення дисципліни, стануть основою інженерної відповідальності, технологічної культури й здатності приймати рішення, які впливають на безпеку поїздів та результативність перевезень країни.

Метою видання підручника є забезпечення системної підготовки здобувачів вищої освіти шляхом формування у них глибоких теоретичних знань і практичних умінь у галузі забезпечення надійності та проведення технічної діагностики рухомого складу залізниць.

Підручник покликаний:

– надати студентам цілісне уявлення про основні поняття, моделі, методи і підходи до аналізу надійності технічних об’єктів залізничного транспорту;

– навчити застосовувати сучасні методи технічної діагностики для оцінювання технічного стану вузлів, агрегатів і систем рухомого складу;

– розвинути здатність критично аналізувати інформацію, обирати ефективні методи ремонту, технічного обслуговування та модернізації на основі результатів діагностики;

– сприяти формуванню навичок самостійного вирішення інженерних завдань щодо підвищення надійності та довговічності рухомого складу;

– підготувати студентів до професійної діяльності у сфері експлуатації, ремонту, конструювання та утилізації залізничної техніки відповідно до сучасних вимог безпеки та якості.

Підручник також орієнтований на розвиток у студентів навичок роботи з нормативними документами, використання інженерних розрахунків і діагностичних методик для ухвалення практичних рішень у професійній діяльності.

Ефективне управління технічним станом рухомого складу є однією з базових умов надійної, безпечної та економічно обґрунтованої роботи залізничного транспорту України, а також інтеграції в європейський транспортний простір згідно із сучасними стандартами.

Науково-технічний прогрес і проблема надійності техніки

1.1. Зростання значення надійності під час НТП

Проблема надійності не нова, хоча наука про надійність технічних систем і технічних об'єктів зародилася лише в середині ХХ століття. Можна не сумніватися в тому, що первісна людина, ідучи на полювання, скажімо, на мамонта з найпростішою зброєю – кам'яною сокирою або пікою, сподівалася, що це знаряддя полювання не підведе її в бою, що воно надійне. Людина, що має надто обмежені технічні та енергетичні можливості рук і ніг (як органів праці), але наділена здатністю мислити, упродовж багатьох століть створювала дедалі досконаліші знаряддя праці, машини, покладаючи на них дедалі *важливіші* та *відповідальніші* (і, звісно, дедалі складніші) функції, які не могла виконати сама через зазначену обмеженість.

Зі збільшенням кількості та складності створюваних і застосовуваних людиною знарядь праці, полювання і війни, зі створенням дедалі потужніших і ефективніших машин, споруд і систем, зростало і практичне значення надійності. Взагалі кажучи, можна стверджувати, що історія розвитку людського суспільства – це історія винаходу, створення й удосконалення різних знарядь праці, технічних пристроїв і відповідних технологій для задоволення постійно зростаючих потреб і запитів людей. У результаті працею багатьох поколінь створено величезну техносферу – друга рукотворна, штучна «природа», в якій і існує сучасна людина.

Процес нарощування техносфери не був рівномірним у часі. Багато сотень років цей процес був мляво текучим. Темпи його прискорення істотно зросли у зв'язку з початком науково-технічного прогресу (промислова революція на початку ХІХ століття) і його сучасною стадією – науково-технічною революцією, що стартувала в середині ХХ століття.

На підставі аналізу зміни протягом багатьох століть поколінь технічних пристроїв різного призначення встановлено закон їх *стадійного розвитку*. Його зміст полягає в наступному. До появи перших знарядь праці нечисленні тоді трудові функції людина виконувала за допомогою своїх «робочих органів»: рук, ніг, зубів (перенесення різних предметів – на собі, розмелювання зерен злаків, коріння – зубами тощо).

Поява перших знарядь (скребок, кам'яне зубило, сокира, найпростіша колісна тачка, кам'яні жорна тощо) знаменує початок *першої стадії розвитку техніки*, коли технологічні функції людина поклала на створені інструменти, знаряддя праці, а енергетичну та інші функції виконувала сама. *На другій стадії* було створено технічні пристрої, що дають змогу виробляти енергію, необхідну для приводу інструмента, верстата, технологічної або транспортної установки (водяне колесо, вітряний двигун, вітрило, парова машина, двигун внутрішнього згоряння тощо).

Таким чином, у кам'яному столітті почався процес застосування технологічних інструментів (це можна назвати «інструменталізацією праці»), у XVIII столітті – процес «механізації», у середині XX століття – «автоматизація» виробництва. А нині – комп'ютеризація планування та управління виробничою діяльністю людини.

Зростання *важливості* та *складності* функцій, що покладаються на створювані технічні об'єкти (ТО), спричиняє зростання не тільки їхньої складності, а й відповідальності за своєчасне, якісне, ефективне виконання заданих функцій, що підвищує вимоги до їхньої надійності.

З плином часу збільшувалися не тільки кількісні показники «техносфери» (кількість видів технічних об'єктів різного призначення та їхніх модифікацій, серійність або обсяг партій однойменних інструментів, машин, апаратів, систем, складність або кількість елементів у них), а й якісні показники, які характеризують функціональні параметри, що впливають на продуктивність та ефективність (потужність, швидкість, точність та ін.), а також визначають інтенсивність використання машин і навантажень на їхні деталі (механічні та електромагнітні навантаження, температура, тиск тощо).

Перші парові машини, як і перші двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), мали потужність у кілька кінських сил.

Потужність двигунів сучасних космічних ракет досягла фантастичних величин – сотень мільйонів кіловат. За 7–8 десятиліть розвитку локомотивів їхня потужність зросла в 10–15 разів. Наприклад, зростання потужності тепловозів із 1948 р. характеризується таким рядом:

TE1 – 1000 к.с., TE2 – 2000 к.с., TE3 – 4000 к.с., 2TE10 – 6000 к.с., 2TE121 – 8000 к.с., 2TE136 – 12000 к.с.

Дуже показовим є зростання питомої потужності ДВЗ, що припадає на одиницю маси двигунів різних років випуску (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Динаміка зростання питомої потужності теплових двигунів

Роки випуску	1900	1913	1931	1953	1954	1955	Сучасний авіаційний поршневий	Сучасний авіаційний реактивний
Питома потужність, к.с./кг	0,004	0,007	0,016	0,033	0,100	0,330	0,7–1,2	2,0–3,5

Дані, наведені в табл. 1.1, показують, що за 80–90 років питома потужність поршневих ДВЗ зросла в 300 разів, відповідно зросли навантаження на деталі і, звісно, знизилася питома витрата металів.

Найважливішою вимогою до сучасного технологічного обладнання є точність обробки деталей і чистота поверхні. Ці вимоги постійно зростають. Колись Джеймс Ватт з гордістю повідомляв, що в його машині між поршнем і циліндром «не можна просунути навіть маленький палець». А винахідник Ползунов, роблячи першу парову машину, перевіряв зазори в ній п'ятаком, товщина якого сягала 6 мм.

Сучасні ж верстати дають змогу обробляти деталі з точністю до мікрометрів і навіть їхніх часток. Так, наприклад, точність геометричних форм отворів і валів нерідко коливається в межах 0,5–2,0 мкм, а некоцентричність, непаралельність і неперпендикулярність поверхонь низки деталей потрібно витримати в межах 0,6–3,0 мкм. У паливних насосах високого тиску тепловозних дизелів зазор між втулкою і плунжером вимірюється в частках мікрометра.

Нові принципи і методи реєстрації світлового випромінювання інтенсивністю до одного кванта на секунду запропонували вчені. Створені ними прилади знайшли застосування в астрофізиці, ядерній фізиці, оптиці, електроніці, технології виробництва мікросистем і багатьох інших галузях науки і техніки. У сучасних приладах, у генній інженерії, квантовій механіці атом речовини став реальним об'єктом, який не лише вивчають, а й переміщують на потрібне місце за бажанням дослідника (ідеться про відстані, вимірювані в нанометрах – 10^{-9} м). У принципі, сучасний силовий атомний мікроскоп має достатню чутливість для дослідження одиничного електрона.

У розпорядженні вчених та інженерів є прилади, що вимірюють вагу з точністю до двох мільйонних часток грама, температуру – до однієї сотисячної частки градуса, які реєструють відхилення сили струму в мільярдні частки ампера за мільйонні частки секунди і настільки ж швидкі коливання напруги в стотрильйонні частки вольт. Якою ж має бути точність деталей цих приладів? І що вийде, якщо хоч одна деталь не задовольнятиме вкрай жорстким вимогам точності? Такий прилад не зможе правильно контролювати технологічний процес. А в результаті відмова однієї ненадійної деталі може призвести до випуску великої партії непридатної продукції або до аварії великої технічної системи.

Швидкість є основним функціональним показником багатьох сучасних машин, призначених не тільки для транспортування вантажів і пасажирів, а й для перероблення (оброблення) матеріалів, енергії або інформації. Так, за період розвитку авіації швидкість літаків зросла більш ніж у 100 разів. Якщо перші літальні апарати мали швидкість не більше понад 40 км/год, то швидкість космічних кораблів і ракет досягла 40 тис. км/год, що в 1000 разів перевищує швидкість перших літаків. Зростають швидкості руху і рухомого складу наземного транспорту: на вітчизняних залізницях швидкість руху вантажних поїздів – до 100 км/год, пасажирських – до 160 км/год, на зарубіжних високошвидкісних залізничних лініях – до 450 км/год; для вантажних автомобілів – до 100–200 км/год, легкових – до 200–250 км/год.

Високі швидкості широко використовують і у виробництві. Конструктивне і технологічне вдосконалення верстатів дає змогу, наприклад, довести частоту обертання шпинделя внутрішньо-шліфувального верстата до 120–150 тисяч обертів за хвилину. Ротори газотурбінних двигунів мають частоту обертання до 40–60 тисяч обертів за хвилину.

Величезних швидкостей досягнуто в області переробки інформації шляхом автоматизації цього складного процесу за допомогою комп'ютерів. Англійському математику Шенксу знадобилося 15 років, щоб дізнатися число «пі» з точністю до 707-го знаку. Електронна обчислювальна машина (ще зразка 60-х років) менш ніж за одну добу «видала» це число з 2048 знаками після коми, попутно виправивши помилки Шенкса. Проведені в 60-ті року в Інституті кібернетики Академії наук дослідження показали, що за ручного методу проектування залізниці завдовжки в кілька сотень кілометрів, що проходить гірською місцевістю, розв'язання з потрібною точністю лише однієї з частин цієї задачі – оптимального профілювання – потребуватиме щонайменше 50 років. Сучасна обчислювальна машина вирішує це завдання за кілька хвилин.

Комплексною автоматизацією виробничих процесів досягається така швидкість, точність, сталість параметрів, економія, яку людина безпосередньо забезпечити не може. Автомати можуть уловлювати те, що недоступно людині: невидиме світло, нечутні звуки і багато іншого. І, зрозуміло, вони можуть це зробити лише в тому разі, якщо працюють надійно.

Автоматика є основою подальшого науково-технічного прогресу. Але чим складнішими і багатограннішими стають її завдання, тим більше зростає значення її надійності. Уже зараз впровадження автоматизації в низці випадків гальмується не відсутністю необхідних приладів і пристроїв, а їх недостатньою надійністю. Тому вирішальною умовою технічного прогресу стає проблема забезпечення високої надійності машин і обладнання, усіх технічних об'єктів.

Перш ніж викладати інженерну сутність проблеми надійності техніки та шляхи її вирішення, візьмемо кілька уроків у природи. Вона – хороший учитель, їй багато в чому людина зобов'язана кожним своїм досягненням. Творці перших кораблів і підводних човнів вивчали будову організму риб. Жуковський під час розроблення теорії повітроплавання вивчав політ птахів. І сучасним творцям машин нешкідливо повчитися у природи – творця живих організмів, спостерігати, як вирішується проблема надійності в природі.

Подивимося з цих позицій на людський мозок. Можна сміливо сказати, що сьогодні серед усіх творінь людських рук, серед усіх чудес техніки немає нічого, що хоча б наближалось б до нього за складністю, економічністю, а головне, надійністю і гнучкістю роботи. Мозок людини складається приблизно з 14 мільярдів нервових клітин – нейронів, які цілеспрямовано керують 100 трильйонами клітин організму. Тіло людини має 639 м'язів, 206 кісток скелета.

Припустимо, ми захотіли б створити електронну машину з кількістю елементів релейної дії, що відповідає кількості нейронів, наявних у мозку людини. Якби ми використовували такі елементи як тригери на напівпровідникових приладах об'ємом один кубічний сантиметр кожний і розмістили б їх впритул один до одного, об'єм такої машини дорівнював би приблизно сумі будівлі центрального району міста Дніпро. Для живлення такої машини потрібна була б електростанція потужністю в кілька десятків мільйонів кіловат, а для її охолодження – потужна річка. Людський мозок вільно вміщається в черепній коробці, займаючи лише близько 1,5 кубічних дециметрів, споживає лише кілька ват і при всьому цьому виконує свої найскладніші функції з ра-

зуючою надійністю, якій може позаздрити найдосконаліший у світі технічний пристрій.

За рахунок чого ж досягається дивовижна надійність роботи людського мозку? Можливо, за рахунок дуже високої надійності кожного нейрона? Виявляється, ні. Окремо взятий нейрон являє собою елемент, значно менш надійний, ніж, наприклад, електромеханічне реле або транзистор. Завдяки винятково доцільній організації, що виражається в множинності резервних елементів і зв'язків між ними, надійність роботи людського організму виявляється значно вищою, ніж надійність кожного з його органів. Таким чином, живі організми є яскравим прикладом високонадійних систем, що складаються з величезної кількості менш надійних, а часом і вкрай ненадійних взаємодіючих елементів.

Висока надійність характерна не тільки для мозку людини. Ми часто скаржимося на своє серце, нарікаємо на те, що до старості воно починає пустувати. Але чи замислюємося ми над тим, яку гігантську роботу протягом життя людини виконує серце? Наше серце скорочується 60–70 разів на хвилину і під час кожного скорочення викидає в судини 60–70 кубічних сантиметрів крові. Це означає, що за годину серце перекачує близько 300 літрів крові, за добу – понад 7 тисяч літрів, за рік – 2 мільйони 500 тисяч літрів, за 70 років – 175 мільйонів літрів або 175 тисяч кубічних метрів! За 70 років життя людини серце скорочується майже 3 мільярди разів! Чи можемо ми назвати хоч один технічний пристрій, який міг би витримати хоча б соту частину такої кількості увімкнень і вимкнень? Усе це показує, наскільки далека ще надійність найдосконаліших технічних пристроїв і систем від надійності роботи живих організмів.

Вивчення живої природи сприяло успішному вирішенню питань надійності при конструюванні багатьох складних технічних пристроїв. Усім відомо, які винятково високі вимоги висуваються до надійності космічних кораблів і ракет, особливо тих, що несуть на собі людину. Завдяки чому ж забезпечувалося виконання цих вимог? Крім вдосконалення конструкцій і технології виготовлення деталей і вузлів, використовуються й інші способи.

Це, наприклад, резервування елементів, що виконують певну функцію, коли в разі відмови одного елемента потрібна функція виконується резервним елементом. Хоча резервування підвищує надійність системи, можливість його застосування при створенні, наприклад, космічної апаратури дуже обмежена, тому що доводиться збільшувати її розміри і масу.

З арсеналу природи взято і використання так званої функціональної надмірності, під якою розуміють здатність організму в разі виходу з ладу тих чи інших його елементів покласти виконання їхніх функцій на інші елементи.

Складнішим шляхом, також запозиченим у природи, є самоперерозподіл функцій елементів системи. У цьому разі елементи, що зберегли працездатність, не тільки приймають на себе функції елементів, які вийшли з ладу, а й перебудовуються і навіть змінюють свою «кваліфікацію», щоб забезпечити життєздатність організму за меншої кількості елементів.

Але основний шлях до досягнення високої надійності полягає у створенні таких технічних систем, які не тільки автоматично попереджають про можливість виходу з ладу тієї чи іншої частини системи (вбудовані діагностичні системи), а й, подібно до того, як це робиться в живому організмі, автоматично вводять у дію резервні елементи та канали, унеможливаючи небезпеку припинення роботи.

1.2. Техніко-економічні втрати, спричинені зниженням надійності

Недостатня надійність технічних об'єктів завдає економіці великих економічних збитків. Наслідки відмов машин, технічних систем і об'єктів можна розділити на дві категорії:

- прямі втрати через відмову, аварію, катастрофу (простій машин, що відмовили, виробництва, тобто невиконання заданих функцій, завдань; вплив на здоров'я і життя людей; шкідливий екологічний вплив на навколишнє середовище);

- дуже великі витрати на відновлення технічних пристроїв, що відмовили, їх ремонт і відновлення працездатності.

На машинобудівних заводах витрати на ремонт і утримання обладнання становлять 10–20 % від загальної величини цехових витрат. Щорічно 10–15 % технологічного обладнання піддається капітальному ремонту, 20–25 % – середньому і 90–100 % – поточному. Щорічні витрати на ремонт техніки у вугільній, гірничорудній, лісозаготівельній промисловості та сільському господарстві досягають 15–20 % її вартості.

Витрати на ремонт і технічне обслуговування за термін служби машини в кілька разів перевищують її вартість: для автомобілів – у шість

разів, для літаків – до п'яти разів, для верстатів – до восьми разів. На частку тракторобудівних заводів припадає лише 22 % потужностей, а на частку заводів із випуску запчастин до тракторів – 34 %, на частку ремонтних підприємств – 44 %. Інакше кажучи, на ремонт тракторів витрачається у чотири рази більше виробничих потужностей, ніж на їх виготовлення.

Трудомісткість ремонту і технічного обслуговування багатьох будівельних і дорожніх машин за термін їх служби приблизно в 15 разів перевищує трудомісткість виготовлення нових.

Витрати на ремонт локомотивів, моторвагонних поїздів і вагонів становлять близько 20 % експлуатаційних витрат залізниць країни. Близько 30 % працівників локомотивного господарства зайняті на ремонті локомотивів. Ремонт кожної одиниці рухомого складу залізниць за весь термін служби обходився більш ніж у 10 разів дорожче за її первісну вартість [1].

Недостатній рівень надійності технічних засобів залізничного транспорту спричиняє затримки поїздів, зниження пропускної та провізної спроможності мережі, а також створює додаткові ризики для стабільності перевізного процесу. Уже до середини 1980-х років, на тлі стрімкого зростання вантажонапруженості, спостерігалось помітне збільшення як абсолютних, так і відносних затримок поїздів, серед яких значна частка була пов'язана з незадовільним технічним станом рухомого складу. Подібні відхилення призводили до погіршення ключових експлуатаційних показників залізничного транспорту, порушували ритмічність роботи промислових підприємств, сільськогосподарських виробництв і суміжних галузей народного господарства, завдаючи економічних збитків державі та стримуючи розвиток транспортної системи в цілому.

Додатково варто відзначити, що низька надійність об'єктів тягового та нетягового рухомого складу збільшує потребу в аварійно-відновлювальних роботах, підвищує експлуатаційні витрати, посилює навантаження на ремонтні потужності та створює ризики «зриву» графіка руху поїздів. Сукупність цих факторів зумовлює необхідність упровадження сучасних підходів до технічного обслуговування, діагностування та прогнозування відмов – як запоруки підвищення ефективності функціонування залізничної інфраструктури.

1.3. Надійність як складова якості технічних об'єктів

Кожній речі, виробу, виду продукції притаманні свої, особливі, властиві тільки їм показники якості. Коли ми купуємо продукти харчування, для нас важливо, щоб вони були свіжими, поживними, смачними. Купуючи тканину, ми цікавимося не тільки її зовнішнім виглядом, а й її щільністю, міцністю на розтягнення і на розрив, дізнаємося, чи сильно вона мнеться, линяє, чи сідає після прання. Якість виробів промислового призначення оцінюють за технічними показниками, параметрами, характеристиками. Наприклад, для оцінки якості локомотива враховуються функціональні показники: потужність, швидкість, сила тяги (під час рушання, на керівному підйомі), питома витрата палива або електроенергії на одиницю виконаної роботи тощо.

Якість – це філософська категорія. Вважається, що вона вперше була піддана аналізу Аристотелем. Під якістю він розумів відмінність між предметами за ознакою «хороший – поганий». Якісний – значить хороший.

Це визначення якості дуже суб'єктивне. У виробника продукції може бути одна думка, а у споживача цієї ж продукції дещо інша. Це й зрозуміло, оскільки сформулювати універсальне визначення, яке гарантувало б прийнятну якість вершкового масла та дитячої іграшки, локомотива й автомобіля, прокатного стана й літака, не так просто. Коли ми говоримо, що якість продукту низька – значить, вона не задовольняє нашим потребам, у нас є претензії. Причому ці претензії не обмежуються однією якою-небудь ознакою речі. Таким чином, якість виробу оцінити за допомогою одного показника неможливо. Якість – це сукупність властивостей продукції, і щоб управляти цими властивостями (посилювати одні, послаблювати інші), необхідно конкретизувати показники, які б відображали ці властивості та якість загалом. Показник якості продукції – як правило, кількісна характеристика сукупності параметрів продукції, яку розглядають стосовно певних умов її створення, експлуатації та споживання. До таких показників у загальному випадку відносять показники призначення, надійності, технічної логічності, стандартизації та уніфікації, транспортабельності та безпеки, а також ергономічні, естетичні, патентно-правові, екологічні та економічні показники, рис. 1.1.

Показники призначення характеризують властивості продукції, що визначають основні функції, для виконання яких вона призначена, зумовлюють сферу її застосування і корисний ефект від використання.

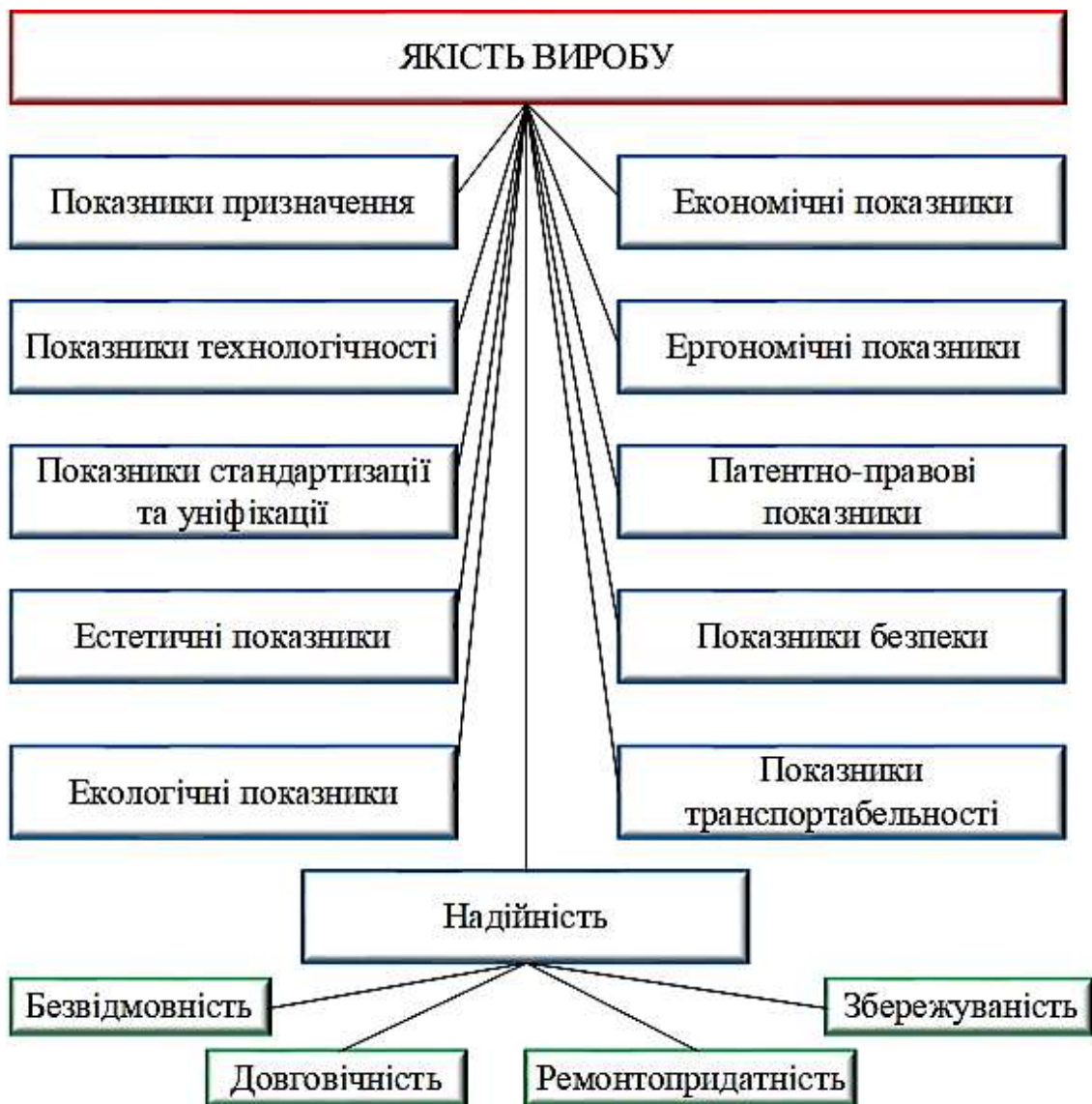


Рис. 1.1. Основні властивості, що характеризують якість виробу

Наприклад, коефіцієнт корисної дії, динамічний діапазон, питома потужність або маса, коефіцієнт використання матеріальних ресурсів, питома витрата палива, вага, габарити тощо.

Економічні показники визначають досконалість виробу за рівнем витрат матеріальних, паливно-енергетичних і трудових ресурсів на його виробництво й експлуатацію. Це, насамперед, ціна виробу – оптова, якщо йдеться про виробничу продукцію, і роздрібна, якщо йдеться про товари народного споживання. Крім ціни споживача цікавлять витрати на транспортування, установку і налагодження придбаного виробу, а також усі види витрат під час його використання за призначенням.

Показники технологічності характеризують ефективність використаних конструкторсько-технологічних рішень для забезпечення високої продуктивності праці при створенні виробу та його відновленні в процесі використання.

Показники стандартизації та уніфікації характеризують питому вагу стандартних та уніфікованих елементів у виробі, а також рівень уніфікації з іншими виробами.

Патентно-правові показники багато в чому впливають на оцінку конкурентоспроможності виробів. До них належать: показники патентного захисту, патентної чистоти, територіального поширення.

Ергономічні показники характеризують зручність і комфорт споживання (експлуатації) виробу в середовищі використання, під яким розуміють простір, у якому людина (оператор, машиніст) здійснює функціональну діяльність.

Естетичні показники характеризують інформаційну та художню виразність, раціональність і оригінальність форми, цілісність композиції, досконалість виробничого виконання виробу.

Показники транспортабельності характеризують пристосованість продукції до транспортування без її використання або споживання.

Екологічні показники характеризують рівень шкідливих впливів на навколишнє середовище, що виникають під час експлуатації або споживання продукції. У міру погіршення стану довкілля екологічні показники набуватимуть дедалі більшого значення.

Показники безпеки характеризують особливості та наявність у конструкції виробу пристроїв, що забезпечують безпеку людини (обслуговуючого персоналу) під час його використання.

Таким чином за кожним видом технічного пристрою є свій набір параметрів, показників якості, зазначених у паспорті. Але чи можна на підставі паспортних даних, наприклад, нового верстата і його технічних характеристик зробити остаточний висновок про його якість? Будь-який досвідчений виробничник скаже: «Давайте все ж таки попередньо випробуємо верстат у роботі». І з такою попередньою пропозицією важко не погодитися. Річ у тім, що всі паспортні показники і параметри відображають лише початкові технічні можливості верстата, але ці можливості перетворюються на дійсність тільки тоді, коли верстат бере участь у процесі праці, тобто коли він працює. Машина, яка не бере участі в процесі праці, природно, марна. Тому під час оцінки якості будь-якої машини для нас важливі не тільки її високі номінальні технічні дані, а й її фактична здатність безвідмовно працювати протягом якомога тривалішого часу, зберігаючи свої початкові технічні характеристики.

Однак жодна машина, хоч би як відмінно вона була зроблена, не працює нескінченно довго без єдиної несправності, без поступового погіршення своїх початкових технічних показників. Будь-який технічний пристрій може пропрацювати безвідмовно лише деякий обмежений час, що залежить від закладеного в нього ресурсу в конкретних умовах експлуатації. Тому потрібне відновлення втраченої працездатності ремонтом або заміною елементів.

Таким чином, кожен технічний пристрій має тією чи іншою мірою здатність, властивість зберігати протягом експлуатації свої початкові характеристики і здатність виконувати задані функції в справному і працездатному стані. Ця властивість визначається його надійністю. Отже, фізичний сенс надійності виробу полягає у властивості зберігати свої експлуатаційні характеристики в часі. Очевидно, чим довше зберігає виріб свою справність, працездатність, чим рідше відмовляє, то він надійніший і, природно, є більш якісним. Іншими словами, надійність як властивість виробу, машини, верстата є однією зі складових якості поряд з їхніми функціональними, технологічними, економічними та ергономічними показниками. Отже, висока якість виробу містить у собі не тільки високі показники таких його властивостей, як продуктивність, швидкість, потужність, точність тощо, а й його високу надійність. Ці складові якості органічно взаємопов'язані, мають значення тільки у взаємодії одна з одною.

Сама по собі надійність ще не визначає високої якості верстата, машини, локомотива. Вони можуть бути винятково надійними, але володіти дуже недосконалими технічними характеристиками: малою потужністю і продуктивністю, низькою точністю, швидкістю. Але відмінні початкові характеристики ненадійного в роботі технічного об'єкта не будуть повноцінно використані.

Отже, надійність – це одна з обов'язкових складових якості будь-якого технічного об'єкта. Однак, будучи лише одним з елементів якості, надійність значно відрізняється від усіх інших її властивостей, оскільки вона: є найзагальнішою комплексною властивістю, яка характеризує корисність будь-якого технічного виробу, машини, приладу; надійність – це єдина спільна властивість величезної більшості промислових виробів; надійність реалізується лише в часі, усі інші властивості мають миттєві значення; надійність не підлягає інструментальному виміру, а визначається розрахунками (імовірнісними чи статистичними) та випробуванням дослідних зразків.

Таким чином надійність є однією з основних властивостей виробу, її фундаментом. Річ у тім, що найдосконаліші початкові характери-

ки виробу – це необхідна, але ще не достатня умова його високої якості, тому що всі номінальні параметри і показники виробу показують, по суті, лише його технічні можливості. Ці можливості можуть бути використані тільки в процесі експлуатації. Отже, якісні вироби повинні мати не тільки високі початкові (паспортні) характеристики, а й мати здатність зберігати ці характеристики протягом встановленого часу використання виробу. Причому, чим відповідальніші функції, що виконуються виробом, тим вищими мають бути вимоги до надійності.

Відповідно до ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення» [2], **надійність** (dependability) – це властивість об’єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні (або основні) функції¹ в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Надійність є комплексною властивістю, що залежно від призначення об’єкта і умов його застосування, може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність чи певні поєднання цих властивостей. Наведений термін використовують лише для загального не кількісного опису вказаних властивостей

Комплексність властивості «надійність» виражається в тому, що технічний пристрій тим надійніший, що рідше він відмовляє, чим довше зберігає працездатність, чим простіше та дешевше відновлюється після відмови. Для повнішої і детальнішої оцінки в розгляд вводять часткові властивості, що становлять комплексну властивість «надійність» це – безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість. Для їх визначення слід розглянути стани технічних об’єктів і події, під якими розуміють переходи технічних об’єктів з одного стану в інший.

Справним станом (або просто *справність*, як це зазначено в [2]) технічного об’єкта (наприклад, локомотива або вагона, їх вузла або деталі) називається такий, за якого він задовольняє всім вимогам нормативно-технічної документації, або за [2] – «стан об’єкта, за яким він здатний виконувати усі задані функції об’єкта». Якщо технічний об’єкт не задовольняє хоча б одній із цих вимог, то він перебуває в *несправному* стані (або у стані *несправність*, як це зазначено в [2])). За [2] *несправний стан* об’єкта це стан, за яким він нездатний виконувати хоч би одну із заданих функцій об’єкта. Несправність чисто є наслідком відмови об’єкта, але може бути й без неї.

¹ Потрібні (основні) функції – функцій об’єкта, виконання яких розглядають як необхідну умову відповідності об’єкта його призначенню. Всі функції об’єкта можна умовно розподілити на основні та допоміжні. Допоміжні функції – функції, невиконання яких не порушує відповідності об’єкта його призначенню.

Перебуваючи в несправному стані, технічний об'єкт може бути *працездатним*¹ або *непрацездатним*² залежно від ступеня впливу несправності на виконання ним робочих функцій у конкретних умовах експлуатації. Якщо технічний об'єкт справний, то він обов'язково працездатний.

Під *відмовою* технічного об'єкта (наприклад, локомотива або вагона) розуміють подію, внаслідок якої втрачається працездатність або порушується встановлений порядок нормальної експлуатації та ремонту. Відмовою обладнання або деталі технічного об'єкта вважається подія, внаслідок якої втрачається їхня працездатність із необхідністю проведення ремонту або заміни. *Дефект* технічного об'єкта – це несправність, яка не спричиняє порушення встановленого порядку нормальної експлуатації та ремонту або несправність, що не порушує жодної з потрібних функцій об'єкта.

Відповідно до [2] **безвідмовність** (reliability) це властивість об'єкта виконувати подібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку. Якщо уточнити, то безвідмовність це властивість безперервно зберігати працездатність протягом необхідного часу або наробітку в конкретних умовах експлуатації.

Під **довговічністю**³ технічного об'єкта (вузла, деталі) розуміють властивість тривало, з можливими перервами на ремонт, зберігати працездатність до відмови або іншого граничного стану.

Ремонтпридатність⁴ технічного об'єкта – це його властивість, яка полягає в пристосованості до запобігання, виявлення та усунення відмов і дефектів.

Під **збереженістю**⁵ технічного об'єкта розуміють його властивість безперервно зберігати робочі властивості в заданих межах протягом необхідного часу в конкретних умовах зберігання.

¹ Працездатним називається стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати **усі** потрібні функції.

² Непрацездатним називається стан об'єкта, за яким він нездатний виконувати **хоч би одну** з потрібних функцій.

³ Довговічність – це властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

⁴ Ремонтпридатність – це властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту.

⁵ Збережуваність – це властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, під час і після зберігання та (чи) транспортування.

На підставі сказаного вище можна визначити надійність технічного об'єкта як його комплексну властивість, зумовлену безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю і збереженістю.

Надійність проявляється під час експлуатації системи й оцінюється кількісними показниками, що визначаються на основі обробки дослідно-статистичних даних.

1.4. Короткі відомості з історії розвитку науки про надійність

Наука про надійність технічних пристроїв – одна з наймолодших прикладних інженерних наук, яка бурхливо розвивається, але проблема, що є предметом цієї науки, – надійності – одна з найдавніших. Хоча питаннями забезпечення надійності людина цікавилася з моменту створення першого знаряддя праці (полювання), теорія надійності як самостійна наука сформувалася тільки в середині ХХ століття. До цього часу надійність техніки забезпечувалася в основному використанням накопиченого практичного досвіду, тобто емпірично. До настання епохи машинного виробництва інструменти, найпростіші машини були не серійними, як зараз, а одиничними, виготовленими конкретним майстром, який мав свій досвід, свої «секрети» виготовлення якісних виробів. Це, однак, не означає, що вимоги до надійності технічних пристроїв і споруд були відсутні. Історичні дані свідчать про те, що ще в давнину надійності споруд, зброї приділялася гідна увага. Майже 4000 років тому у Вавилоні існував закон, який свідчив, що, якщо збудований архітектором будинок розвалиться і при цьому загине його власник, архітектор підлягає смертній карі. Якщо загинуть і члени сім'ї власника будинку, то підлягають страті й члени сім'ї архітектора (відлунням цього закону в наш час є традиція: під час випробування збудованого мосту автор стоїть під мостом).

До виокремлення теорії надійності в самостійну науку питання надійності розв'язували розрізнено, емпірично та інтуїтивно. Але з розвитком науки і техніки поступово на перший план починають вставати питання технічної та економічної ефективності створюваних технічних об'єктів. Різко зросли кількість технічних об'єктів, їхня складність, важливість і відповідальність виконуваних ними функцій, економічний ефект від використання та розмір збитків від відмов, вплив

на безпеку людей та екологічний вплив на природне середовище. Теорія надійності зародилася після другої світової війни. Цьому сприяв прискорений розвиток у повоєнні роки кібернетики, космічної техніки, механізації та автоматизації всіх галузей виробництва. Однак академік А. І. Берг на той час писав, що *«...було б неправильно обмежувати значення проблеми надійності лише одними засобами електронної автоматики та електроніки. У міру розвитку й ускладнення всіх видів техніки проблема надійності набуває загального значення»*.

Академік Б. В. Гнеденко дав визначення теорії надійності як прикладної науки: *«Загальна наукова дисципліна, що вивчає загальні методи та прийоми, яких слід дотримуватися під час проєктування, виготовлення, приймання, транспортування та експлуатації виробів для забезпечення максимальної їхньої ефективності в процесі використання, а також розробляє загальні методи розрахунку якості пристроїв за відомими якостями їхніх частин, що входять до їх складу»* [3].

Нині теорія надійності стала методологічним підґрунтям спрямованості загальноінженерних і спеціальних технічних дисциплін на забезпечення високої якості промислової продукції.

1.4.1. Етапи розвитку науково-технічного напрямку «надійність»

Науково-технічний напрям «надійність» пройшов у своєму розвитку низку етапів. Уже на початку століття для забезпечення надійності використовували «запаси» міцності. Однак такий «запас» часто призводив до збільшення габаритів і маси виробів і, відповідно, до додаткових витрат матеріалів. Прагнення зменшити небажані ефекти стимулювало вивчення реальних навантажень на виріб під час експлуатації, несучої здатності матеріалів і конструкцій, процесів зміни їхнього стану внаслідок старіння, втоми та інших чинників. Основою для розв'язання завдань із забезпечення надійності стали теорія імовірностей та математична статистика. На їх основі вже в 30-ті роки була встановлена статистична природа коефіцієнтів запасу міцності та сформульовано поняття відмови як перевищення навантаження над міцністю. У нашій країні програма електрифікації дала поштовх розвитку ідей «резервування» при паралельному використанні генераторів і трансформаторів у процесі створення енергосистем, що забезпечували безперебійне постачання електроенергії всім галузям народного господарства.

Особливо бурхливий розвиток теорії надійності розпочався з інтенсифікацією електроніки й автоматики, авіації та ракетно-космічної техніки. У 1951 р. проблема надійності отримала визнання Конгресу США. Напівемпіричні підходи до забезпечення надійності перестали задовольняти вимоги науки, пов'язані з необхідністю зменшення маси й габаритів апаратури, скорочення строків проектування та впровадження зразків нової техніки. За таких умов виникли й швидко розвинулися методи створення нового науково-технічного напрямку «надійність». Розвиток цього напрямку можна поділити на три етапи: 50-ті роки – становлення напрямку; 60-ті роки – етап класичної теорії надійності; з 70-х років до теперішнього часу – етап системних методів надійності.

Перші системні дослідження у сфері надійності технічних засобів зародилися наприкінці Другої світової війни. Поштовхом до їх активного розвитку стало усвідомлення у США значних втрат боєздатності військової техніки через часті відмови. Зафіксовано, що до 60 % літаків, підготовлених для бойових операцій на Далекому Сході, виявилися несправними, а близько 50 % електронної апаратури виходили з ладу ще на етапі зберігання, не потрапивши до експлуатації. Напрацювання електронних приладів у бомбардувальниках інколи не перевищувало 20 годин, що свідчило про надзвичайно низьку надійність елементної бази. Саме це визначило електроніку як першу галузь, де питання надійності стало критично важливим і вимагало наукового підходу.

У період 1943–1958 рр. у США активно проводився статистично-імовірнісний аналіз напрацювання до відмови, оснований переважно на експоненційному (показниковому) законі розподілу. Відмови розглядалися як випадкові події, властиві елементам апаратури, що формувало уявлення про відмову як певну неминучість.

Перший інтенсивний етап у вирішенні проблем надійності був пов'язаний зі спробами зрозуміти причини цих відмов та знайти шляхи їх усунення. У грудні 1950 р. військово-повітряні сили США створили спеціальну групу для дослідження проблем надійності радіоелектронного обладнання та розроблення заходів із підвищення його працездатності й зменшення експлуатаційних витрат. Наприкінці 1952 р. Міністерство оборони заснувало консультативну групу з надійності за участю представників промисловості та державних структур. У 1957 р. група опублікувала доповідь із рекомендаціями, значна частина яких була інтегрована у військові стандарти на електронні системи.

У ході цих досліджень встановлено, що головною причиною відмов є недостатня надійність окремих елементів. Це поставило перед науковцями фундаментальні питання: які фактори визначають ненадій-

ність елементної бази? чи можливо створити надійну систему з ненадійних компонентів? та чи можна передбачити надійність системи ще на стадії проєктування?

Відповідь на поставлені питання вимагала вивчення впливу на відмови експлуатаційних чинників – температури, середовища, вібрацій, електричних навантажень тощо. У результаті було зібрано багатий статистичний матеріал для оцінки характеристик надійності елементів та їх залежності від навантажень. У свою чергу розвиток методів аналітичного розрахунку надійності виробів дав змогу прогнозувати їхню надійність. Уже на цьому етапі відбувається перерозподіл значущості джерел ненадійності. Центр ваги переміщується на механічне та електромеханічне обладнання, на конструкцію, на стики обладнання, на проведення робіт в умовах, що недостатньо добре вивчені. У 1953 р. з'являються перші контракти, які вимагали експериментально підтверджених показників надійності апаратури. Починається перехід до другого етапу.

Зростаюча кількість випробувань на надійність і критичний аналіз причин відмов показали їхню істотну залежність від конструкції виробів, технології виробництва та умов експлуатації. Було встановлено, що причини відмов можна виявити та усунути. Вимоги американських стандартів того часу знайшли найповніше втілення у великій програмі «APOLLO» щодо забезпечення надійності космічних літальних апаратів у процесі розроблення, виробництва та наземного експериментального відпрацювання, яка дала змогу виявити численні конструктивні та технологічні дефекти, що призвели б до відмови у польоті зі 100 %-вою імовірністю. У процесі робіт на цьому етапі виявилася недостатня ефективність вибіркового контролю та статистичних випробувань на надійність, які не виключають відмови техніки під час експлуатації. У результаті з'явилися нові запитання: як на ранніх етапах створення систем закласти можливості забезпечення високої надійності? Як співвідносити програму забезпечення надійності зі ступенем відповідальності розв'язуваних завдань і з очікуваним ефектом?

Починаючи з 1968 р. відбувається перехід до третього етапу. Національне агентство з аеронавтики та космічних досліджень NASA опублікувало новий варіант вимог до надійності, що заклав основу сучасних систем і програм забезпечення надійності технічних об'єктів. Серед них: чітке планування й ефективне керівництво всіма роботами у сфері надійності; визначення спеціальних завдань із забезпечення надійності та їхнього місця в процесі проєктування; оцінювання надійності (з урахуванням взаємного впливу документального та матема-

тичного забезпечення) шляхом використання інженерного аналізу, випробувань, експериментальних оцінок і прогнозування; регулярно та своєчасне інформування про стан справ у галузі надійності розроблюваної системи. Відмінною рисою третього етапу є зосередження зусиль на якісних аспектах надійності, але це не виключає й кількісні, що становлять основний зміст попередніх етапів.

Розроблені в галузі космічної техніки програми та системи забезпечення надійності нині застосовуються за кордоном під час створення найрізноманітніших видів техніки. Типова методика проведення заходів, пов'язаних із забезпеченням надійності, закріплена в численних нормативно-технічних документах за двома основними напрямками. Перший з них стосується потенційної надійності, що охоплює конструктивні методи (вибір матеріалів і запасу міцності, зменшення взаємного впливу елементів конструкції тощо) та технологічні (посилення допусків, підвищення щільності поверхневих шарів елементів конструкції тощо). Другий напрям стосується забезпечення експлуатаційної надійності, який, своєю чергою, спирається на методи стабілізації умов експлуатації (термостабілізація, захисні покриття, стабілізатори напруги тощо) та технічного обслуговування (ремонт і профілактика).

Сучасним концепціям організації робіт у галузі надійності в більшості країн надається конкретне практичне спрямування. Так, наприклад, у Японії надруковано спеціальне керівництво для директорів фірм, у якому визначено конкретні заходи, якими повинні керуватися фірми при проведенні робіт у галузі надійності [1]. До них належать:

- аналіз причин відмов виробів-аналогів;
- використання стандартизованих елементів;
- спрощення конструкції виробу;
- усунення помилок при конструюванні та виготовленні;
- постійне вивчення досягнутого рівня надійності;
- забезпечення необхідного рівня надійності комплектувальних елементів;
- використання резервування;
- забезпечення легкості огляду і технічного обслуговування;
- чітка регламентація в технічних умовах режимів експлуатації і функціональних обмежень;
- установлення умов зберігання та максимально допустимої тривалості зберігання;
- вибір необхідної упаковки, що враховує удари та вібрації при транспортуванні;

- контроль за субпідрядниками, вибір субпідрядників, що поставляють продукцію гарантованої якості;
- урахування часу виконання своїх функцій та регламентація терміну використання виробу, що допускається;
- точне дотримання регламенту технічного обслуговування.

Теорія надійності сформувалася як самостійна технічна наука, що поєднує математичні методи з інженерними підходами проєктування та технологіями створення високонадійних технічних систем. Різноманітність об'єктів, які досліджуються у цій галузі, зумовила появу окремих напрямів, орієнтованих на різні типи виробів та відповідні умови їх роботи. Одним із таких напрямів є надійність рухомого складу залізниць – ключова сфера, якій присвячено даний підручник.

Надійність залізничного рухомого складу має спільні риси з іншими технічними об'єктами, проте вирізняється низкою особливостей, що визначають підходи до його проєктування, обслуговування та контролю технічного стану:

- рухомий склад є складною механічною або електромеханічною системою, що працює в умовах змінних навантажень та напружено-деформованих станів елементів;
- конструкції вагонів і локомотивів містять широкий спектр матеріалів – сталі, сплави, полімери, гуми, композиції – що по-різному старіють, руйнуються та вимагають різних методів контролю;
- експлуатаційний цикл рухомого складу тривалий, а інтенсивність використання висока, що підсилює значущість прогнозування ресурсу;
- існує розгалужена система технічного обслуговування, ремонту та діагностування, що включає сучасні методи відновлення деталей та оцінювання їх технічного стану;
- вантажні вагони мають знеособлений характер експлуатації, не закріплені за певним депо та можуть курсувати за межами України, що ускладнює збирання статистики відмов і організацію випробувань;
- рухомий склад експлуатується у складі поїзда на одній колії, що створює режим просторової обмеженості: відмова однієї одиниці може зупинити рух усього потоку та поставити під загрозу безпеку руху поїздів.

1.4.2. Розвиток надійності рухомого складу

Перші кроки, пов'язані із забезпеченням надійності та безпечної експлуатації паровозів, було зроблено ще 1879 р. На своєму першому з'їзді інженери з рухомого складу сформулювали завдання так: «Яким умо-

вам повинна задовольняти конструкція паровоза, щоб якнайменше вимагати дрібного ремонту?». І донині таке питання актуальне для локомотивників. А вже на другому з'їзді в 1880 р. «було порушено дебати і балотуванням (тобто голосуванням) знову прийнято в принципі необхідність дотримання терміну для постановки паровоза в ремонт після відомого пробігу і часу, а також необхідність розрізнення в цьому відношенні пасажирських і товарних паровозів». При цьому зверталася увага на необхідність врахування як пробігу, так і терміну експлуатації, і пропонували преміювати машиністів за більший, ніж установлено, пробіг, якщо забезпечувався хороший технічний стан локомотива.

Передбачалися ремонти трьох розрядів: великий; виправлення і ревизія котла; виправлення. Але вирішили, що кожна залізниця за місцевими умовами виробляє і встановлює свої норми. Закладені тоді принципи подовження працездатності паровозів застосовні і при нових видах тяги. На тому ж з'їзді видатний вчений та інженер-практик А. П. Бородин виступив із пропозицією створення випробувальної станції. Після реалізації цієї пропозиції конструктори й експлуатаційники отримали матеріал для підвищення якості побудови та використання локомотивів. У 1900-х роках на Катеринославській (нині Придніпровській) залізниці розробили спосіб ремонту, суть якого полягала в тому, що замість знятих із паровоза деталей ставили заздалегідь відремонтовані. Так досягалося не тільки скорочення часу простою локомотива, а й поліпшення якості ремонту. Водночас це був один із кроків до принципу взаємозамінності, вперше у світі розробленому інженерами і реалізованому під час будівництва паровозів серії Е на заводах Німеччини та Швеції. Із цих двох принципів почалося застосування допусків і ремонтних градацій деталей¹.

Основоположний внесок зроблено у світову теорію і практику вивчення надійності локомотивів «Конторою дослідів над паровозами», організованою в 1912 році професором Ю. В. Ломоносовим. Заслуговує на вивчення розроблені та здійснені ним методики визначення експлуатаційних якостей локомотивів, організації випробувань, способи одержання достовірних висновків та їхнього практичного використання. У другій половині 1950-х років припинилося будівництво паровозів, а залізничний транспорт переходив на електричну й тепловозну тягу. Загострилася проблема розроблення наукових методів аналізу та підвищен-

¹ Ремонтні градації деталей — це класифікація деталей за ступенем зношення або пошкодження, яка визначає можливість їх подальшого використання після ремонту або відновлення. Цей підхід дає змогу ефективно використовувати ресурс деталей, зменшувати витрати на нові комплектуючі та продовжувати термін служби обладнання.

ня надійності електричного та дизельного рухомого складу. Цю роботу виконували дослідні інститути та локомотивні кафедри вишів, а також відповідні лабораторії. Серед найважливіших заходів цього етапу вирішення проблеми надійності були: розробка першого галузевого стандарту «Надійність тягового рухомого складу. Основні поняття і терміни»; видання наукових праць про надійність тягового рухомого складу, методичних матеріалів для визначення кількісних показників надійності вузлів, деталей і локомотивів загалом; розробка навчальних програм, курсів лекцій та методичних посібників для проведення занять з надійності рухомого складу зі студентами та слухачами факультетів підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників залізниць; створення на залізницях системи збирання й аналізу статистичних даних про надійність локомотивів. Так, проводилося аналіз та аналіз статистичних даних про надійність локомотивів. Проводився аналіз кількісних показників надійності локомотивів, виконаний багатьма науковими колективами за допомогою утворених у депо груп надійності. Виявляли залежності надійності локомотивів від кліматичних умов, інтенсивності експлуатації та режимів роботи, якості виготовлення та ремонту, кваліфікації локомотивних і ремонтних бригад та інших факторів. Було зроблено висновок про необхідність відповідності системи обслуговування та ремонту рівню надійності локомотивів у конкретних умовах експлуатації. Визначено основні напрямки вдосконалення цієї системи шляхом оптимізації величини міжремонтних періодів для основних вузлів, агрегатів і деталей, кількістю та обсягом видів технічних обслуговувань і ремонтів, їх чергування в ремонтному циклі. Як критерії оптимальності брали мінімум сумарних витрат на ремонти з урахуванням збитків від відмов локомотивів на лінії та забезпечення заданого рівня безвідмовності вузлів, які безпосередньо впливають на безпеку руху. Планово-попереджувальну систему технічного обслуговування та ремонту електровозів, тепловозів і моторвагонного рухомого складу постійно удосконалювали, що знаходило відображення в наказах, що періодично видаються, і правилах ремонту.

Уже тоді, у 70-х роках, співробітниками локомотивних кафедр вишів було розпочато розроблення методів і технічних засобів діагностування вузлів локомотивів як основного напрямку підвищення надійності й удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту тягового рухомого складу, сформульовано теоретичні й методичні засади переходу від жорсткої планово-попереджувальної системи технічного обслуговування та ремонту до гнучкішої й диференційованої. І це стало

основним змістом наукових робіт, виконаних на третьому етапі співробітниками локомотивних кафедр спільно з працівниками залізниць.

У навчальний план для студентів було включено навчальну дисципліну «Надійність і діагностика рухомого складу».

Сформовано основні завдання у сфері надійності рухомого складу, які на науковій основі має вирішувати інженер:

- кількісна оцінка рівня надійності наявного парку рухомого складу у конкретних умовах експлуатації на різних полігонах тяги;
- створення нового рухомого складу із заданим оптимальним рівнем надійності для різних умов експлуатації;
- розробка оптимальної системи технічного обслуговування та ремонту рухомого складу;
- розробка методів і технічних засобів діагностування рухомого складу, а також автоматизації процесів аналізу, контролю надійності в експлуатації;
- розробка і застосування сучасних технологій відновлення працездатності відмовлених і зношених вузлів та деталей рухомого складу;
- оптимізація системи постачання запасних частин і матеріалів для ремонту рухомого складу.

Як прикладна наука надійність рухомого складу, – це наукова база для створення системи керування надійністю одиницями рухомого складу в експлуатації, забезпечення стійкості й ефективності перевізного процесу та безпеки руху поїздів.

1.5. Методологія дослідження надійності

Надійністю об'єкта (системи, елемента) називають властивість, що забезпечує можливість виконання цим об'єктом заданих (потрібних) функцій із заданими характеристиками за певних умов експлуатації та протягом необхідного інтервалу часу. Визначення показників надійності – кількісних характеристик зазначених властивостей залежить, насамперед, від принципової точки зору на появу відмови – події, яка полягає в переході об'єкта (елемента, системи) зі стану працездатного в непрацездатний.

Через складність фізичних процесів, що призводять до відмови, і неможливість врахувати всі початкові умови, а також випадковий вплив навантажень у процесі експлуатації, нині загальноприйнято вва-

жати появу відмови випадковою подією в тому розумінні, що задана структура об'єкта та умови його експлуатації не визначають точно моменти і місце виникнення відмов. Прийняття цієї концепції зумовлює математичний апарат, який має бути використаний для визначення показників надійності та побудови на їхній основі теорії надійності. Як відомо, кількісною характеристикою випадкової події є її імовірність, яка приблизно дорівнює частоті прояву події в досить довгій послідовності спостережень за незмінних умов.

Таким чином, основними математичними апаратами теорії надійності є теорія випадкових функцій, теорія імовірностей і математична статистика.

1.5.1. Априорний аналіз надійності

Теоретичне дослідження надійності та практичні оцінки показників надійності об'єктів можна віднести до двох етапів, які відрізняються один від одного і постановками завдань, і вихідними даними, і використовуваними математичними апаратами.

Перший етап дослідження надійності називають *априорним аналізом надійності*. Існують ще кілька визначень цього етапу оцінки надійності: аналітичні методи розрахунку надійності розроблюваних систем, проектна оцінка надійності. Априорний аналіз надійності проводять на стадії проектування системи, коли конструкторами намічено кілька конкуруючих структурних схем системи. Цей аналіз передбачає априорі повністю відомими кількісні характеристики надійності всіх використовуваних елементів системи. Насправді ж на стадії проектування зазначеними априорними даними конструктор має лише для тих типів елементів, які тривалий час перебували в експлуатації. Для нових елементів немає достовірних кількісних характеристик надійності, і їх можна задавати за аналогією з показниками надійності застосованих елементів або за інтуїцією.

Таким чином, априорний аналіз базується на априорних (імовірнісних) характеристиках надійності, які лише приблизно і неповно відображають дійсні процеси в апаратурі. Проте для порівняння показників надійності кількох структурних схем систем використання априорного аналізу може бути дуже корисним. Цей аналіз дасть змогу виявити на стадії проектування слабкі з погляду надійності місця в конструкції та вжити необхідних заходів для їх усунення, а також відкинути незадовільні варіанти побудови системи. Саме в цьому сенсі априор-

ний аналіз надійності, не претендуючи на надання достовірних кількісних характеристик, має істотне значення в практиці проектування і тому становить невід'ємну частину технічних проектів.

Оскільки апіорний аналіз передбачає повністю визначеними імовірнісні характеристики надійності, то для його здійснення використовують методи теорії імовірності й теорії випадкових процесів.

1.5.2. Апостеріорний аналіз надійності

Другий етап дослідження та оцінки показників надійності вже розроблених і виготовлених виробів називають *апостеріорним аналізом надійності (експериментальна оцінка)*. Його проводять на підставі статистичного опрацювання експериментальних даних про працездатність і відновлюваність систем, отриманих у процесі її налагодження, випробувань та експлуатації. Метою випробувань на надійність і збирання експлуатаційних даних про надійність є оцінка досягнутого рівня надійності системи та її елементів.

Такі оцінки отримують методами математичної статистики за результатами спостережень (обмеженого обсягу). При цьому припускають, що результати спостережень є випадковими величинами, які підкоряються закону розподілу імовірностей заданого типу з невідомими параметрами. У цьому разі завдання апостеріорного аналізу полягає насамперед в оцінці невідомих параметрів за результатами спостережень і в подальшому розрахунку за допомогою цих оцінок необхідних показників надійності.

1.6. Підходи до розрахунків надійності

Розрізняють два підходи до розрахунків надійності: *параметричний* і *непараметричний*.

Параметричний підхід заснований на використанні моделей відмов навантаження – міцність і параметр – поле допуску. Застосування таких моделей можливе тоді, коли є інформація про закономірності роз-

поділів і процесів змін міцності або визначальних параметрів¹ об'єктів, а також параметрів навантажень або допустимих значень параметрів. Параметричний підхід точніший за непараметричний, однак потребує більшого часу досліджень та розрахунків за параметричного підходу складніший. Наприклад, параметричний підхід може бути використаний під час розрахунку імовірності відмови (обриву) контактних дрітів за зносом. У цьому випадку ступінь зносу контактного дроту можна прийняти як параметр, що визначає міцність. Допустиме значення зносу, за якого дріт обривається, буде межею поля допуску.

За *непараметричного* підходу використовують інформацію тільки про моменти відмов технічних об'єктів. Зрозуміло, що обмеження інформації про стан об'єктів призводить до зниження точності розрахунків. Нині для значної частини пристроїв електропостачання через брак знань про закономірності зміни їхніх параметрів розрахунок надійності може бути виконаний тільки таким способом.

Прийнято виділяти *три рівні досліджень надійності*.

Перший рівень – об'єкт розглядають як чорну скриньку, характеристика станів якої – непрацездатний стан і справний. Для отримання показників надійності такого об'єкта щоразу випробування необхідно проводити заново. Оцінки показників надійності за такого способу їх визначення найдостовірніші, оскільки отримані під час випробування саме цього об'єкта. Наприклад, якби такий рівень досліджень застосовували під час визначення показників надійності тягової підстанції, це потребувало б великих витрат часу і матеріальних засобів. Практично такий підхід означав би, що тягову підстанцію потрібно увімкнути і в робочому режимі протримати досить довго, щоб проявилися всі закономірності відмов. Водночас отримані показники надійності не можна було б поширити на інші тягові підстанції через наявні відмінності в конструкції, термінах служби, параметрах навантажень тощо. Зрозуміло, що такий підхід можна застосувати тільки до недорогих і нескладних об'єктів, які не мають відмінностей у конструкції та умовах функціонування.

Другий рівень – об'єкт розглядають як систему, що складається з окремих елементів. Стан кожного елемента може бути працездатний або не працездатний. Надійність усього об'єкта (системи) розраховується на основі надійності окремих елементів. Переваги такого підходу полягають у можливості розрахунку надійності нового об'єкта без

¹ Визначальний параметр відповідно до ДСТУ 3334-96 – це фізичний або функціональний параметр, значення якого визначає працездатність об'єкта (досягнення визначальним параметром деякого найбільшого або найменшого значення означає, що об'єкт приведено до непрацездатного стану).

проведення його випробувань. Наприклад, знову спроектовано і виготовлено пристрій релейного захисту. Елементна база такого пристрою містить перелік типових елементів (мікросхем, транзисторів, діодів тощо). Показники надійності таких елементів відомі з довідкової літератури. На основі відомих показників надійності всіх елементів розраховується загальну надійність пристрою релейного захисту. При внесенні в схему пристрою якихось змін розрахунок можна повторити й отримати уточнені показники надійності.

Третій рівень – у кожного елемента, що входить в об'єкт, розглядають процеси змін параметрів, і на їхній основі знаходять закономірності зміни параметрів усього об'єкта. А вже за цими закономірностями розраховують показники надійності об'єкта. Такий підхід дає змогу отримати точніші оцінки показників надійності, оскільки він враховує закономірності зміни параметрів і навантажень. Розрахунки виходять досить складними і потребують великого обсягу вихідної інформації про об'єкт. Нині такий підхід використовують у розрахунках надійності авіакосмічної техніки.

Розрізняють також *два види розрахунку надійності* – *структурний і функціональний*. *Структурний розрахунок надійності* не враховує ступеня впливу відмови на працездатність об'єкта. Будь-яка відмова об'єкта однаково впливає на показники надійності. Такий розрахунок простіший, проте не відображає впливу надійності на споживчі якості об'єкта і на процес комерційної експлуатації. Наприклад, обрив струни в ланцюговій підвісці та падіння опори з підвіскою однаково кваліфікуються як відмова контактної мережі. Зрозуміло, що якщо в першому випадку можливий пропуск локомотивів з опущеним струмоприймачем, то в другому випадку рух взагалі неможливий.

Розрахунок *функціональної надійності* передбачає розрахунок надійності виконання заданих функцій об'єкта. Такий розрахунок найповніше показує вплив надійності на споживчі якості об'єкта і враховує не тільки повні, а й безліч часткових відмов. Наприклад, система електропостачання повинна забезпечувати рівень напруги на шинах у межах 2700–3850 В. Але через відмову системи регулювання напруга коливається залежно від навантаження в межах 2500–4000 В. Це призведе до погіршення умов руху локомотивів, проте рух не припиниться. Система електропостачання в цьому випадку виконуватиме свої функції зі зниженням показників якості функціонування.

Запитання до самоконтролю

1. Коли зародилася наука про надійність технічних систем і чому її розвиток став можливим лише в середині ХХ століття?
2. Як збільшення складності технічних об'єктів впливає на важливість надійності в їхньому застосуванні?
3. Яким чином збільшення потужності технічних об'єктів може вплинути на їхню надійність?
4. Що таке «інструменталізація праці», «механізація» та «автоматизація» і як вони відображають етапи розвитку техніки?
5. Що забезпечує високу надійність роботи людського мозку, незважаючи на низьку надійність окремих нейронів?
6. Яке біологічне явище послугувало прототипом резервування в технічних системах?
7. Чому резервування в космічній техніці обмежене, незважаючи на його користь для надійності?
8. У чому полягає принцип функціональної надмірності в природі, і як він використовується в техніці?
9. Як працює самоперерозподіл функцій у живих організмах, і чому цей механізм важливий для стійкості системи?
10. Який основний підхід використовується для підвищення надійності складних технічних систем, за аналогією з живими організмами?
11. Які інженерні рішення були запозичені в природи для підвищення надійності складних систем?
12. Які дві основні категорії наслідків відмов технічних об'єктів?
13. Як відмови технічних систем впливають на здоров'я людей та навколишнє середовище?
14. Яку частку цехових витрат становлять витрати на ремонт і утримання обладнання на машинобудівних заводах?
15. Яку частку експлуатаційних витрат залізниць становлять витрати на ремонт локомотивів і вагонів?
16. Чому ремонт локомотива за весь термін служби обходиться значно дорожче за його початкову вартість?
17. Як підвищення надійності технічних об'єктів може вплинути на економічну ефективність їх експлуатації?
18. Що таке показники якості, і чому вони важливі для оцінки продукції?
19. Як функціональні показники допомагають оцінювати якість рухомого складу?
20. Чому якість є філософською категорією, і як змінюється її сприйняття у виробника та споживача?

21. Які основні групи показників якості існують, і які властивості вони характеризують?
22. Що таке надійність технічного об'єкта, і чому вона є критично важливою складовою якості?
23. Які часткові властивості входять у комплексне поняття «надійність»? Поясніть кожну з них.
24. У чому полягає відмінність між справним і працездатним станом технічного об'єкта?
25. Як відмова технічного об'єкта відрізняється від дефекту? Наведіть приклади.
26. Чому паспортні характеристики машини не завжди відображають її реальну якість у процесі експлуатації?
27. Як можна кількісно оцінити надійність технічного пристрою? Які методи для цього використовують?
28. Як визначається безвідмовність технічного об'єкта? В яких умовах вона проявляється?
29. Що таке довговічність технічного об'єкта, і як вона пов'язана з можливістю проведення ремонту?
30. Що характеризує ремонтпридатність технічного об'єкта? Чому ця властивість важлива для експлуатації?
31. Як визначається збереженість технічного об'єкта? В яких умовах вона зберігається?
32. Які чотири основні властивості формують загальну надійність технічного об'єкта?
33. Як можна оцінити надійність технічної системи? Які дані для цього використовуються?
34. Що стало передумовою для формування теорії надійності як окремої науки?
35. Як забезпечували надійність технічних пристроїв до появи теорії надійності?
36. Яке визначення теорії надійності дав академік Гнеденко?
37. Чому після Другої світової війни зросла потреба у розвитку теорії надійності?
38. Які основні етапи розвитку систем технічного обслуговування та ремонту рухомого складу залізниць?
39. У чому полягає сутність планово-попереджувальної системи ремонту?
40. Як надійність локомотивів пов'язана з безпекою руху поїздів?
41. Які фактори впливають на надійність локомотивів у процесі експлуатації?

42. Яку роль відігравала «Контора дослідів над паровозами» у вивченні надійності рухомого складу?
43. Чому перехід від жорсткої до гнучкої системи технічного обслуговування та ремонту був важливим кроком?
44. Які завдання у сфері надійності рухомого складу мають вирішувати інженери?
45. Як розвиток діагностичних методів вплинув на надійність рухомого складу?
46. У чому полягала користь введення взаємозамінності деталей при ремонті паровозів?
47. Як статистичні дані допомагали вдосконалювати систему ремонту локомотивів?
48. Чому оптимізація постачання запчастин є важливою для підвищення надійності рухомого складу?
49. У чому полягає різниця між параметричним і непараметричним підходами до розрахунку надійності?
50. Які приклади технічних об'єктів можна аналізувати за параметричним підходом?
51. Чому непараметричний підхід менш точний, ніж параметричний?
52. Які три рівні дослідження надійності?
53. Чому перший рівень дослідження надійності не підходить для складних і дорогих об'єктів, наприклад, тягових підстанцій?
54. Яка перевага другого рівня досліджень надійності порівняно з першим?
55. Чому третій рівень досліджень надійності вважається найточнішим?
56. У яких галузях найбільш доцільно використовувати третій рівень досліджень надійності?
57. Яка різниця між структурним і функціональним розрахунками надійності?
58. Чому функціональний розрахунок надійності краще враховує реальні експлуатаційні умови об'єкта?
59. Які типи інформації потрібні для застосування параметричного підходу до розрахунку надійності?
60. У чому полягають труднощі реалізації функціонального розрахунку надійності?
61. Як резервування елементів може впливати на функціональну надійність системи?
62. Від чого залежить визначення показників надійності?

63. Чому появу відмови вважають випадковою подією?
64. Які фактори впливають на неможливість точно передбачити момент і місце відмови?
65. Який математичний апарат використовується для визначення показників надійності?
66. На які два етапи поділяється дослідження надійності об'єктів?
67. Чим відрізняються ці два етапи дослідження надійності?
68. Що таке апіорний аналіз надійності?
69. На якій стадії проводять апіорний аналіз надійності?
70. Чому апіорний аналіз корисний при проектуванні систем?
71. Які дані використовуються для апіорного аналізу надійності?
72. Чому неможливо точно визначити кількісні характеристики надійності нових елементів?
73. Які методи використовуються для апіорного аналізу надійності?
74. У чому практичне значення апіорного аналізу для проектування технічних систем?
75. Що таке апостеріорний аналіз надійності?
76. На якому етапі проводиться апостеріорний аналіз надійності?
77. Які основні методи використовуються для апостеріорного аналізу?
78. Які дані використовуються для апостеріорного аналізу надійності?
79. Яка мета випробувань на надійність і збору експлуатаційних даних?
80. Яке головне завдання апостеріорного аналізу надійності?

Короткі відомості з теорії імовірностей та математичної статистики

2.1. Загальна характеристика теорії імовірностей і математичної статистики, їхньої ролі в наукових дослідженнях

Для кількісного аналізу та математичного моделювання випадкових величин і подій у фізиці й прикладних інженерних науках застосовують теорію імовірностей і математичну статистику. Теорія імовірностей є математична наука, що вивчає закономірності випадкових подій і процесів та розподілу випадкових величин. Математична статистика використовує методи збирання й опрацювання статистичних даних для одержання числових характеристик випадкових величин, а також способи оцінки їхньої достовірності.

У різноманітних застосуваннях теорії імовірностей і математичної статистики можна виокремити три типи взаємовідносин цих розділів математики з фізикою й прикладними інженерними науками:

- створення математичного апарату таких наук, як статична фізика і квантова механіка (що описують явища, які лежать в основі матерії, енергії, а також процеси їхніх змін і перетворень);
- опис випадкових процесів, до категорії яких слід віднести практично всі процеси зміни параметрів технічних систем під час їхнього функціонування та взаємодії з навколишнім середовищем;
- оброблення результатів спостережень природних явищ і процесів у технічних системах, а також соціально-економічних процесів у людському суспільстві (біологічних спільнотах).

В основі цих взаємовідносин лежать абсолютно об'єктивні чинники. У першому випадку – це статистичний характер деяких фундаментальних законів природи, у другому – випадковий характер явищ, що утворюють складний фізичний процес у природі або в технічній системі, і, нарешті, у третьому – експериментальний характер резуль-

татів спостережень і вимірювань. В останньому випадку йдеться насамперед про наявність випадковостей (точніше кажучи, похибок), властивих результатам спостережень і вимірів, оскільки вони за своєю природою (у зв'язку з участю суб'єкта, що спостерігає або вимірює) являють собою випадкові величини.

Теорія імовірностей будується *дедуктивно*¹, виходячи з деяких аксіом і визначень. Найсуворіший підхід пов'язаний із використанням теорії множин. Зазвичай починають із побудови «елементарної теорії імовірностей», у якій розглядають випадкові події зі скінченим числом можливих результатів. Наприклад, якщо ми кидаємо гральну кістку, то є всього шість можливих результатів, а саме: 1, 2, 3, 4, 5 або 6. Потім теорія поширюється на випадок, коли кількість можливих результатів дискретне і необмежене (кількість відмов деякого технічного об'єкта за термін служби). Далі розглядається випадок, коли кількість можливих результатів досліду (експерименту) нескінченне (наприклад, кількість значень тривалості роботи деякого технічного об'єкта до відмови).

Для математичної статистики характерна, головним чином, *індуктивна*² побудова, оскільки в цьому разі процес іде у зворотному напрямку (від спостереження події до гіпотези). При цьому необхідно побачити за випадковими коливаннями величин дію причинного закону.

Без знання теорії імовірностей і математичної статистики не можуть бути правильно поставлені завдання теорії надійності та сформульовані основні її поняття, а також визначені кількісні показники якості.

Аналіз, розрахунок і прогнозування показників надійності локомотивів, їхніх вузлів і деталей ґрунтуються на вивченні випадкових подій, випадкових величин, випадкових процесів, оскільки зниження і втрата працездатності технічного об'єкта, відмова будь-якої його деталі зумовлені факторами, більшість з яких загалом мають випадковий характер (якість матеріалу, якість виготовлення та збирання, режими роботи та величина навантажень, умови експлуатації та ін.). Тому тривалість роботи системи або деталі, що визначається моментом настання відмови, стає випадковою величиною.

Хоч би як намагалися забезпечити сталість умов виробництва, однорідність вихідних матеріалів і незмінність технологічних процесів, неминучі коливання цих компонентів призводять на практиці до розкиду властивостей готових виробів. Щодо кожного конкретного зразка

¹ Дедукція – метод переходу від знання загальних закономірностей до окремого його прояву (аналіз понять).

² Індукція – метод переходу від знання окремих фактів до знання загального (аналіз фактів).

немає можливості передбачити абсолютно точно термін його служби, а має сенс говорити лише про імовірність того чи іншого значення цього терміну.

Процеси зношування і зміцнення неминуче призводять до необхідності вивчення молекулярної та атомної структури матеріалів. Разом із необхідністю вивчення молекулярних і субмолекулярних властивостей у теорію надійності вносять і математичні методи, властиві цій частині фізики, – методи теорії імовірностей і математичної статистики. Тому теорія імовірностей є не тільки обчислювальним апаратом теорії надійності (у частині обчислення кількісних показників надійності), а й її методологічною базою, тому що вона дає змогу якнайповніше описати процеси створення і використання виробів, моделювати, прогнозувати ці складні процеси, тобто керувати цими процесами.

2.2. Основні поняття й терміни теорії імовірностей

Кожна імовірнісна модель описує деякий ідеалізований дослід (або спостереження), що має ту властивість мати кілька різних результатів, які називаються подіями. Для стислості запису ці елементарні події позначаються великими латинськими літерами: A , B , C тощо.

Наприклад: подія A – випадання герба під час одного кидання монети; подія B – поява парної цифри на верхній грані гральної кістки під час одного її кидання; подія C – поява несправності машини за T годин її роботи; події $D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_n$ – присутність на лекції відповідно 1-го, 2-го, ..., i -го, ..., n -го студента. Дві події A та B називаються *несумісними*, якщо поява однієї з них виключає появу іншої в одному і тому самому досліді. Наприклад, випадання герба під час кидання монети (подія A) виключає випадання решки (подія B) у цьому досліді.

Поняття несумісних подій може бути поширено на більшу, ніж дві, кількість подій. Наприклад, при киданні ігрової кості можливі шість наслідків події $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$. Усі вони взаємно несумісні, тому що випадання, наприклад, «одиниці» (подія A_1) виключає випадання інших п'яти цифр на гранях.

Несумісні події $A_1, A_2, \dots, A_n$ утворюють *повну групу подій*, якщо в результаті досліду одна з них обов'язково має місце. Найпростішими прикладами повної групи подій є наведені вище досліді з киданням

монети (два можливих результати, тобто дві події) і гральної кістки (шість можливих подій у групі).

Випадкова величина – це величина, яка в результаті досліду може прийняти низку можливих значень. Наприклад, кількість випадінь герба n_r за n кидань монети; кількість відмов машини $n_{\text{відм}}$ за T годин роботи; тривалість роботи до першої відмови $t_{\text{відм}}$ деякої машини тощо. На відміну від випадкових, величини, що приймають строго певне значення, називаються *детермінованими*.

Усі величини (як випадкові, так і детерміновані) можна поділити на *дискретні* та *безперервні*. *Дискретна випадкова величина* в результаті досліду може прийняти кінцеву (або лічильну) кількість можливих значень. *Безперервна випадкова величина* може прийняти нескінченну множину можливих значень, що «щільно» заповнюють числову вісь. Наприклад, кількість відмов $n_{\text{відм}}$ машини за T годин роботи є дискретною величиною, що може набувати тільки невід’ємних цілочисельних значень, тобто $n_{\text{відм}} = (0, 1, 2, \dots i)$, а тривалість роботи до першої відмови $t_{\text{відм}}$ – безперервна випадкова величина, що може набути будь-якого значення з нескінченної безлічі позитивних величин, як завгодно близько розташованих на числовій осі.

У теорії імовірностей велику роль відіграють *функції від випадкових величин*. Якщо швидкість зношування $V_{\text{зн}}$ деякої деталі машини є випадковою величиною, то тривалість роботи до гранично допустимого зношування $t_{\text{пр}}$ як функція цієї швидкості буде також величиною випадковою. Водночас характер перебігу процесу досягнення граничного значення зносу буде випадковим процесом. Випадковий процес є випадковою функцією від незалежної змінної (у більшості застосувань такою змінною є час).

Важливим питанням у теорії імовірностей є визначення поняття «імовірність» події. На жаль, між фахівцями з теорії імовірностей і статистиками немає згоди щодо того, як найкращим чином визначити поняття імовірності. Спроби ввести визначення, засноване на суворій логіці, показали, що є кілька способів формулювання цього фундаментального поняття (комбінаторне визначення, визначення, засноване на теорії міри, теорії множин, частотне визначення). Вибір найбільш прийняттого з них значною мірою справа смаку. Проте важливим є відокремлення двох підходів і двох визначень: *апріорної* (дододослідної) імовірності й *апостеріорної* (післядослідної) імовірності.

У першому випадку імовірність визначається з відомих умов досліду. Покладемо, що результатом досліду є повна група подій $A_1, A_2,$

..., A_n . Кожні дві події несумісні, при цьому всі події рівноможливі. Із цих n подій сприяють появі події B , яка нас цікавить, лише $n(B)$ подій, до того ж $n(B) < n$. Для цих умов апріорна імовірність події B визначається як

$$P(B) = \frac{n(B)}{n}. \quad (2.1)$$

Наприклад, дослід полягає у витягуванні із закритої урни однієї кулі. Відомо, що в урні 25 абсолютно однакових за всіма параметрами (крім кольору) куль, серед них 10 білих і 15 чорних. За описаної схеми дослідів та його умов імовірність витягування білої кулі становитиме відповідно до (2.1)

$$P(B) = \frac{n(B)}{n} = \frac{10}{25} = 0,4.$$

Якщо невідомі умови дослідів (наприклад невідома загальна кількість куль та кількість куль однакового кольору), то оцінити імовірність певної події можна на підставі результатів повторюваних дослідів (експериментів). В описаних вище умовах проводиться N разів витягування кулі. Щоразу фіксують результат і кулю повертають в урну (для забезпечення незмінності умов дослідів). При повторенні дослідів N раз біла куля буде витягнута $N(B)$ раз $[0 \leq N(B) \leq N]$. Тоді відношення $\frac{N(B)}{N}$ буде дослідною частістю події B . Доведено (центральна гранична теорема теорії імовірностей) і перевірено на практиці, що при необмеженому збільшенні кількості дослідів N частота події в межі прагне за величиною до своєї імовірності, тобто

$$P(B) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N(B)}{N}. \quad (2.2)$$

На рис. 2.1 графічно показано результати багаторазово повторених дослідів із кидання монети та визначення частоти випадання герба $\frac{N(B)}{N}$. Добре видно, що зі збільшенням числа проведених дослідів графік частоти асимптотично наближається до величини $P = 0,5$. Це є

наочною ілюстрацією формули (2.2), що впливає з суворо доведених граничних теорем теорії імовірностей.

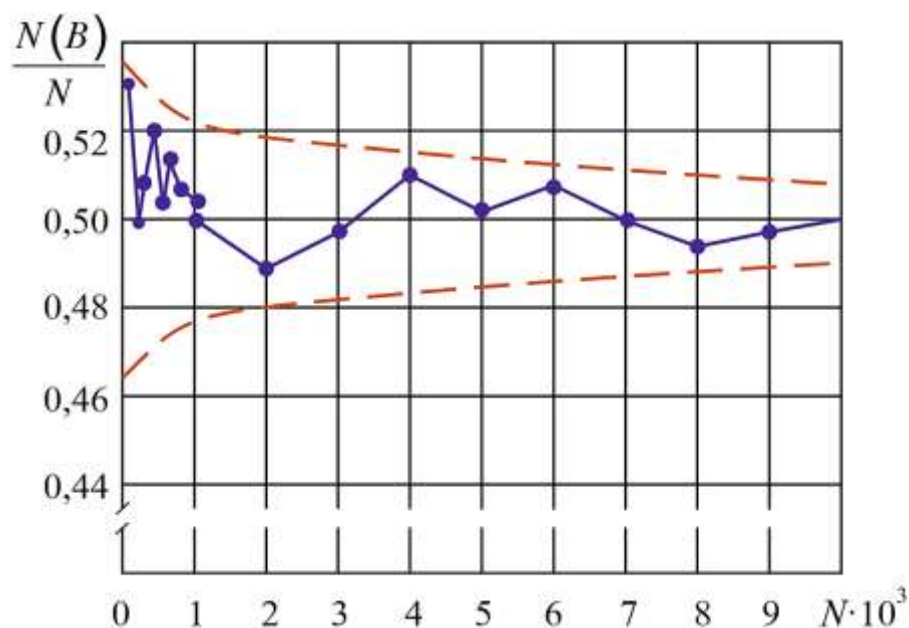


Рис. 2.1. Графік зміни частоти повторення подій зі збільшенням числа дослідів

Отже, імовірність події є кількісною оцінкою можливості її здійснення за даних умов (або ступеня нашої впевненості) і може набувати значень у діапазоні

$$0 \leq P(B) \leq 1. \quad (2.3)$$

Якщо імовірність події близька до одиниці, то подію вважають практично достовірною, якщо ж вона близька до нуля, то – практично неможливою.

2.3. Основні теореми теорії імовірностей

Теорія імовірностей займається визначенням і описом моделей, пов'язаних із поняттям імовірності. Зокрема, у ній розглядаються методи обчислення імовірності деякої події за відомими або заданими імовірностями інших подій, які з нею логічно пов'язані. Прикладами таких логічних зв'язків між подіями є, наприклад, сума подій і добуток подій.

Сумою двох подій A і B у теорії імовірностей називається третя подія C , яка полягає у виконанні або події A , або події B , або подій A і B спільно, що символічно записується у вигляді:

$$C = A + B. \quad (2.4)$$

Приклад 2.1. Проводять одне кидання гральної кістки, у результаті чого на верхній грані може опинитися будь-яке з чисел – 1, 2, 3, 4, 5, 6, тобто є шість рівноможливих подій – $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$. Розглянемо подію: «випадання числа, кратного трьом». Позначимо її C . Логіка підказує, що для здійснення події C достатньо, щоб здійснилися події – або A_3 , або A_6 , тобто

$$C = A_3 + A_6. \quad (2.5)$$

Добутком двох подій A і B називається третя подія C , яка полягає у спільному здійсненні подій A та B , що позначається як

$$C = A \cdot B. \quad (2.6)$$

Під час введення поняття «імовірність події» було зазначено, що одне з його визначень ґрунтується на теорії множин. У цьому випадку події розглядаються як деякі множини, що містять у собі сукупність елементів, які є елементарними подіями. Ці множини можна проілюструвати графічно деякими фігурами, усередині меж яких міститься безліч точок – елементарних подій. Як приклад на рис. 2.2. (*а, б, в*) наведені фігури, що ілюструють несумісні події A і B , сумісні події A і B ; сумісні події A, B, C , а також їхні суми й добутки. Уведені поняття суми й добутку подій можна поширити на кількість подій, що більша за дві (у принципі, вона може бути й нескінченною).

Теорема додавання імовірностей: імовірність суми двох подій дорівнює сумі імовірностей цих подій за мінусом імовірності їхньої спільної появи, тобто

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A \cdot B). \quad (2.7)$$

Отже, щоб знайти імовірність того, що подія належить множині A або множині B , передусім треба скласти імовірності подій A і B . Однак деякі події, що належать одночасно як A , так і B , були б при цьому

пораховані двічі; тому необхідно із суми імовірностей відняти імовірність спільного здійснення подій, тобто $P(A \cdot B)$.

Приклад 2.2. Витягування з колоди, що містить 52 карти, однієї карти. Нехай A позначає, що ця карта «туз», а B позначає «червову масть». Тоді імовірність того, що ця карта виявиться або тузом, або червовою мастю, дорівнює

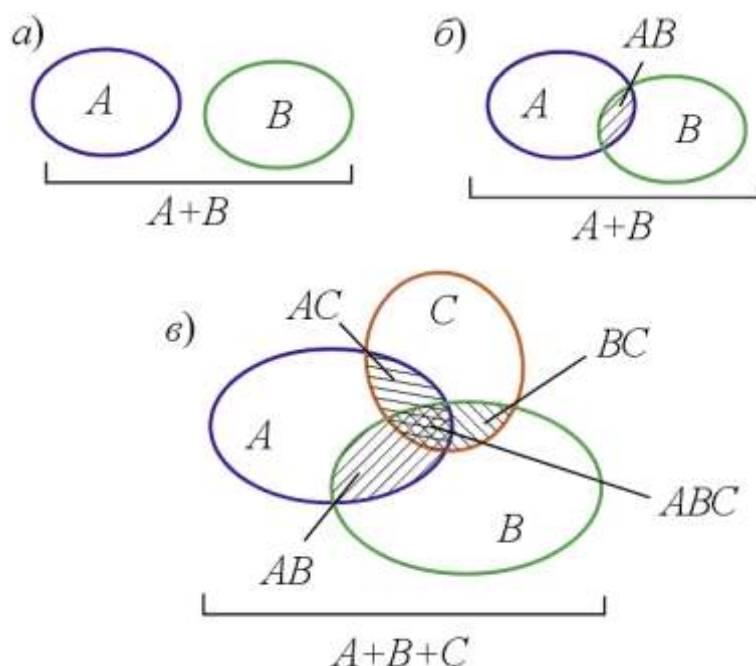


Рис. 2.2. Геометрична інтерпретація подій: а) несумісні події A і B ; б) сумісні події A і B ; в) сумісні події A , B , C

$$P(A + B) = P(\text{"туз"}) + P(\text{"червова масть"}) - P(\text{"туз червової масті"}) = \frac{4}{52} + \frac{13}{52} - \frac{1}{52} = \frac{16}{52}.$$

У разі, коли події A і B несумісні, то

$$P(AB) = 0 \text{ і } P(A + B) = P(A) + P(B). \quad (2.8)$$

Якщо дві події утворюють повну групу подій і є протилежними (у цьому разі події позначають A та $\bar{A}$), то

$$P(A + \bar{A}) = P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (2.9)$$

тому що, за визначенням, хоча б одна з подій, які входять у повну групу, обов'язково в досліді здійсниться. З (2.9) випливає, що

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A). \quad (2.10)$$

Приклад 2.3. Під час кидання монети можливі дві події: випадання «герба» (A) і випадання «цифри» ($\bar{A}$), третього результату немає, тому

$$P(\text{" герб " або " цифра "}) = P(A) + P(\bar{A}) = 1.$$

Вважаючи події A та $\bar{A}$ рівноможливими, знаходимо, що

$$P(A) = P(\bar{A}) = 0,5.$$

Теорему додавання імовірностей можна поширити на випадок кількох подій. Так, для випадку m подій ($A_1, A_2, \dots, A_m$) імовірність їхньої суми виражається формулою:

$$\begin{aligned} P(A_1 + A_2 + \dots + A_m) = & \sum_i P(A_i) - \sum_{i < j} P(A_i A_j) + \\ & + \sum_{i < j < k} P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{m+1} P(A_1 A_2, \dots, A_m). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для випадку трьох сумісних подій як окремий випадок за умови $m=3$ з (2.11) отримаємо

$$\begin{aligned} P(A_1 + A_2 + A_3) = & P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - \\ & - P(A_1 A_2) - P(A_1 A_3) - P(A_2 A_3) + P(A_1 A_2 A_3). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Для випадку, коли події $A_1, A_2, \dots, A_m$ є несумісними і імовірності їхнього спільного здійснення дорівнюють нулю, імовірність їхньої суми

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_m) = \sum_i P(A_i). \quad (2.13)$$

Теорема множення імовірностей. Уведемо спочатку поняття *умовної імовірності*. Припустимо, що подія A_1 може здійснюватися в

досліді n_1 способами, подія A_2 – n_2 способами, подія (A_1A_2) – $n_{1,2}$ способами, при цьому загальна кількість можливих результатів дорівнює N . Тоді

$$P(A_1) = \frac{n_1}{N}. \quad (2.14)$$

$$P(A_1A_2) = \frac{n_{1,2}}{N}. \quad (2.15)$$

Перетворимо вираз (2.15)

$$P(A_1A_2) = \frac{n_{1,2}}{N} = \frac{n_1}{N} \cdot \frac{n_{1,2}}{n_1} = P(A_1) \cdot \frac{n_{1,2}}{n_1}. \quad (2.16)$$

З n_1 випадків, у яких може відбуватися подія A_1 , у відносній частці випадків, що дорівнює $n_{1,2}/n_1$, може відбуватися і подія A_2 . Таким чином, $n_{1,2}/n_1$ є імовірність A_2 за умови, що відбулася подія A_1 . Ця імовірність позначається у вигляді $P(A_2/A_1)$ і називається *умовною імовірністю* події A_2 за умови, що відбулася подія A_1 . З формули (2.16) одержуємо

$$P(A_1A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2/A_1), \quad (2.17)$$

тобто імовірність добутку (спільного здійснення) подій A_1 та A_2 дорівнює добутку імовірності події A_1 на умовну імовірність події A_2 за умови, що відбулася подія A_1 .

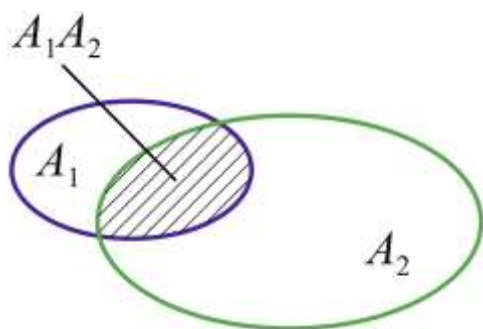


Рис. 2.3. Геометрична ілюстрація сумісних подій

Геометрична інтерпретація поєднання (добутку) подій A_1 та A_2 показана на рис. 2.3.

Оскільки A_1A_2 є частиною A_1 , то

$$P(A_1A_2) \leq P(A_1). \quad (2.18)$$

З (2.17) з урахуванням (2.18) отримуємо

$$P(A_2/A_1) = \frac{P(A_1A_2)}{P(A_1)} \leq 1,0. \quad (2.19)$$

Формулу (2.19) застосовують під час обчислень умовних імовірностей. Якщо подія A_1 відбулася, але не вплинула на імовірність події A_2 , то кажуть, що подія A_2 не залежить від події A_1 , тобто *події A_1 та A_2 є незалежними*. Тоді умовна імовірність $P(A_2/A_1)$ дорівнюватиме імовірності $P(A_2)$, і вираз (2.17) для незалежних подій набуде вигляду:

$$P(A_1 A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2), \quad (2.20)$$

тобто імовірність добутку двох незалежних подій дорівнює добутку імовірностей цих подій.

Приклад 2.4. Із колоди в 52 карти вибирається одна. Нехай подія A_1 означає «туз», а A_2 – «пікова масть». Тоді імовірності цих подій

$$P(A_1) = \frac{4}{52}, \quad P(A_2) = \frac{13}{52}.$$

Оскільки $P(A_1 A_2) = P(\text{"туз пік"}) = \frac{1}{52}$, то $P(A_1 A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2)$, і, відповідно, A_1 та A_2 – незалежні події.

Теорему множення імовірностей можна поширити на кілька подій. Зокрема, для випадку трьох подій добуток імовірностей має вигляд:

$$P(A_1 A_2 A_3) = P(A_1) \cdot P(A_2/A_1) \cdot P(A_3/A_1 A_2). \quad (2.21)$$

Три події взаємно незалежні в тому й тільки в тому випадку, якщо

$$P(A_1 A_2 A_3) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot P(A_3).$$

Імовірність добутку n незалежних подій визначається як добуток їхніх імовірностей

$$P(A_1 A_2 \dots A_{i \dots}) = \prod_{i=1}^n P(A_i), \quad (2.22)$$

якщо ж усі n подій рівноможливі, то

$$P(A_1 A_2 \dots A_{i \dots}) = [P(A_i)]^n. \quad (2.23)$$

Формула повної імовірності. Якщо під час постановки досліду можна зробити n припущень, що виключають одне одного, тобто гіпотез $H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_n$ і якщо подія A може здійснитися в будь-якій із них, то повна імовірність події A обчислюється за формулою:

$$P(A) = P(H_1) \cdot P(A/H_1) + P(H_2) \cdot P(A/H_2) + \dots + P(H_n) \cdot P(A/H_n) = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A/H_i), \quad (2.24)$$

де $P(H_i)$ – імовірність здійснення гіпотези H_i ;

$P(A/H_i)$ – умовна імовірність події A за цієї гіпотези.

Приклад 2.5. У складальний цех деталі надходять від трьох заводів постачальників H_1, H_2 і H_3 у співвідношенні за обсягами поставок у 20, 30 і 50 % відповідно. Відомо, що частка деталей I-го сорту в продукції цих заводів дорівнює відповідно 60, 70 і 80 %.

Необхідно визначити імовірність того, що взята в коморі навмання деталь буде деталлю I-го сорту. Відповідно до (2.24) отримаємо

$$P(A) = P(H_1) \cdot P(A/H_1) + P(H_2) \cdot P(A/H_2) + P(H_3) \cdot P(A/H_3) = 0,2 \cdot 0,6 + 0,3 \cdot 0,7 + 0,5 \cdot 0,8 = 0,73.$$

Повторення дослідів. У сучасному виробництві характерним є випуск великих серій однотипних виробів, їхніх деталей, а також експлуатація парків однотипних машин. Відносно кожного окремого зразка (машини, деталі) ці процеси (випуску та експлуатації) можна розглядати як якийсь виробничий дослід, здійснюваний у певних умовах виробництва та експлуатації, що завершується деяким результатом (одержання деталі тієї чи іншої якості; безвідмовна робота або відмова в експлуатації). Тому теореми про повторення дослідів мають велике прикладне значення для аналізу надійності виробів і моделювання процесів виробництва, експлуатації та відновлення машин.

Досліди називаються *незалежними*, якщо імовірність того чи іншого результату кожного досліду не залежить від того, які результати мали інші досліди. Незалежні досліди можуть проводитися як в однакових умовах, так і в різних. У першому випадку імовірність появи деякої події (результату) A в усіх дослідах одна й та сама, у другому ви-

падку вона змінюється від досліду до досліду. Для першого випадку має місце *частинна теорема про повторення дослідів*.

Якщо проводять n незалежних дослідів в однакових умовах, причому в кожному з них з імовірністю p з'являється подія A , то імовірність $P_{m,n}$ того, що подія A станеться в цих n дослідах рівно m разів, дорівнює

$$P_{m,n} = C_n^m p^m q^{n-m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m}, \quad (2.25)$$

де C_n^m – кількість комбінацій з n дослідів по m разів;

$q = 1 - p$ – імовірність не появи події A .

За зростання кількості дослідів n обчислення за формулою (2.25), яку часто називають *формулою Бернуллі*, стають дуже трудомісткими. У цих умовах доцільно скористатися локальною теоремою Лапласа, яка стверджує, що при досить великому числі дослідів n імовірність появи події m разів дорівнює

$$P_{m,n} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{P(x)}{\sqrt{npq}}, \quad (2.26)$$

де $x = \frac{m - np}{\sqrt{npq}}; P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right).$

Найбільшу точність формула (2.26) забезпечує за p і q , близьких до 0,5. Якщо ж значення імовірностей p і q близькі до 0 або 1, то використовують *формулу Пуассона* (іноді її називають формулою «рідкісних подій»):

$$P_{m,n} = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}. \quad (2.27)$$

При обчисленнях за формулами (2.25), (2.27) слід мати на увазі, що $0! = 1$.

На практиці частіше потрібно знати не імовірність того, що подія A з'явиться рівно m разів, а імовірність того, що m буде перебувати в деяких (допустимих) межах. У цьому разі користуються *інтегральною*

теоремою Лапласа. Вона стверджує: вірогідність того, що кількість m появи події A за n дослідів, задовольняє нерівності

$$t_1 \leq \frac{m - np}{\sqrt{npq}} \leq t_2,$$

прямує до вираження

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx,$$

тобто

$$P\left(t_1 \leq \frac{m - np}{\sqrt{npq}} \leq t_2\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx. \quad (2.28)$$

Для інтегралу

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \Phi(t), \quad (2.29)$$

де $\Phi(t)$ – функція Лапласа, для неї розроблено докладні таблиці. У разі їхнього використання вираз (2.28) перетворюється до більш зручного вигляду:

$$P\left(t_1 \leq \frac{m - np}{\sqrt{npq}} \leq t_2\right) \approx \Phi(t_2) - \Phi(t_1). \quad (2.30)$$

2.4. Розподіли випадкових величин

2.4.1. Розподіли дискретних випадкових величин

Під час розгляду теореми про повторення дослідів з'ясувалося, що під час проведення досліду n разів подія A може статися m разів. При цьому вона може не з'явитися жодного разу ($m = 0$), один раз ($m = 1$), кілька разів ($0 < m < n$) і навіть у всіх дослідах ($m = n$). Прийняття величиною m кожного конкретного значення із сукупності можливих

значень $(0, 1, 2, \dots, x, n)$ є випадковою подією, імовірність якої $P(m = x)$. Позначимо цю імовірність як $P_{m,n}$. Оскільки величина m у результаті n дослідів може набути низки можливих значень, заздалегідь не відомих, то її можна вважати випадковою. І оскільки кожному з можливих значень цієї величини відповідає деяка імовірність (див. визначення у 2.2), то виходить деяке співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини m і відповідними їм імовірностями. Отримане співвідношення називається законом розподілу випадкової величини, тобто величина m розподілена на сукупності можливих значень за деяким законом.

Законом розподілу випадкової величини називається будь-яке співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини та відповідними їм імовірностями.

Для найпростішого випадку, випадання чисел на гранях гральної кістки, кожному числу від 1 до 6 при необмеженому збільшенні кількості дослідів відповідатиме одна й та сама імовірність $1/6$.

Закон розподілу може бути виражений у різних формах. Найчастіше ряд розподілу дискретної випадкової величини X подається у вигляді таблиці, в якій перераховані можливі значення цієї випадкової величини $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ із відповідними їм імовірностями $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n$ (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Ряд розподілу дискретної випадкової величини X

Можливе значення x_i випадкової величини X	x_1	x_2	x_3	$\dots$	x_i	$\dots$	x_n
Імовірність $P(X=x_i) = p_i$	p_1	p_2	p_3	$\dots$	p_i	$\dots$	p_n

Можна подати розподіл дискретної випадкової величини у вигляді аналітичного вираження, наприклад, використовуючи біноміальний закон (2.25).

Приклад 2.6. Під час поточного ремонту розбирають поршневу групу 6-циліндрового дизеля. Відомо, що за міжремонтний термін імовірність відмови поршня становить $p = 1/3$. Який розподіл випадкової величини – кількості поршнів, що потребують заміни?

Після розбирання й огляду поршневої групи можливі варіації: всі поршні справні, відмовив один поршень, два (і так далі до шести тих, що відмовили). Оскільки в дизелі 6 однакових поршнів, умови роботи яких за міжремонтний термін приймають однаковими, можна вважати,

що було шестикратне проведення досліду з можливим результатом у вигляді відмови поршнів (подія A). Обчислимо для кожного значення $x_i = (0, 1, 2, \dots, 6)$ відповідні імовірності p_i , використовуючи формулу (2.25) при $p=1/3$ та $q=1-p=2/3$ і результати зведемо в табл. 2.2.

$$p_i = P(X = m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} = P_{m,6} = \frac{6!}{x_i!(6-x_i)!} \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{x_i} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{6-x_i}.$$

Таблиця 2.2

Ряд розподілу дискретної випадкової величини X (при $n = 6, p = 1/3$)

Можливе значення x_i випадкової величини X	0	1	2	3	4	5	6
Імовірність $P(X=x_i) = p_i$	0,088	0,263	0,320	0,22	0,082	0,016	0,001

Графічне зображення ряду розподілу, представленого в табл. 2.2, зване іноді багатокутником розподілу, показано на рис. 2.4, з якого випливає, що імовірність відсутності відмов поршнів становить приблизно 0,1, а імовірність одночасної відмови всіх поршнів двигуна під час проведення ремонту на два порядки нижча, тобто практично не можлива. Найбільшу імовірність має подія, пов'язана з виявленням під час проведення ремонту відмови двох поршнів, – 0,32. Оскільки всі можливі випадки у розглянутому досліді утворюють повну групу подій, то сума імовірностей p_i для всіх можливих значень $X = x_i$, дорівнює одиниці, тобто $\sum_{x=0}^6 p_i = 1$.

Таким чином, закон розподілу дискретної випадкової величини може бути задано в наступних формах: *аналітичної* – формула (2.25), *табличний* (ряд розподілу, табл. 2.1), *графічний* (багатокутник розподілу, рис. 2.4).

Поряд з імовірністю прийняття дискретною випадковою величиною X конкретного значення x_i , тобто $P(X = x_i) = p_i$, в деяких

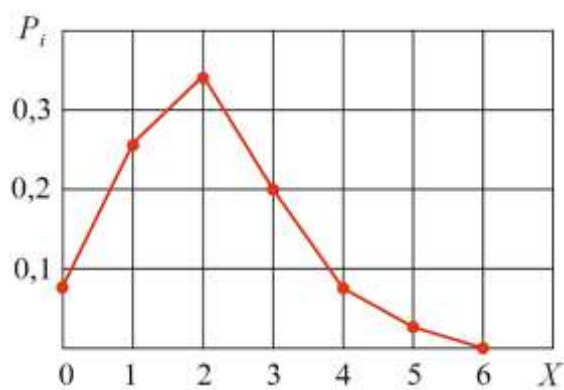


Рис. 2.4. Багатокутник розподілу

випадках корисно знати імовірність того, що X буде не більше за певне значення, тобто

$$P(X \leq x_i) = F(x_i). \quad (2.31)$$

Оскільки подія $(X \leq x_i)$ є сумою подій, що полягають у тому, що величина X прийме будь-яке значення, менше або дорівнює x_i , для визначення імовірності $P(X \leq x_i)$ необхідно відповідно до теореми додавання імовірностей просумувати всі імовірності, відповідні значенням X , що є меншими або дорівнюють x_i , тобто

$$F(x_i) = P(X = x_1 < x_i) + P(X = x_2 < x_i) + P(X = x_i). \quad (2.32)$$

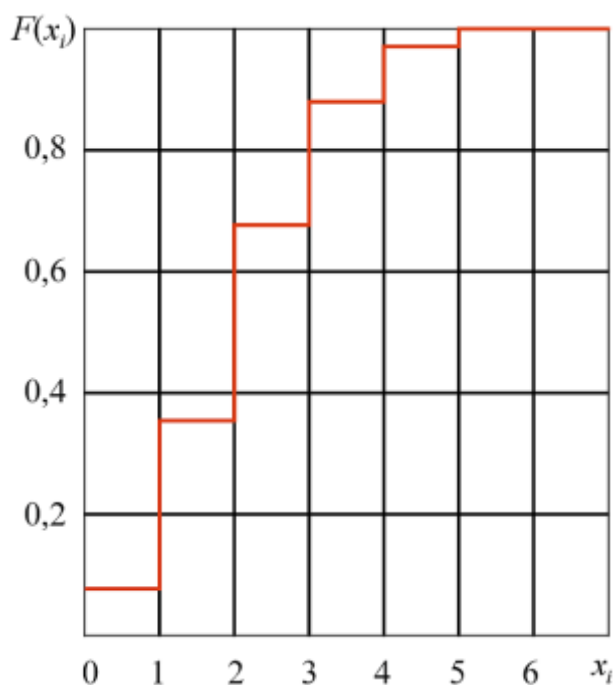


Рис. 2.5. Графік накопиченої імовірності дискретної випадкової величини

На рис. 2.5 показано графічну залежність $F(x_i)$ для умов розглянутого прикладу, що являє собою ступінчасту функцію, яка змінюється від 0 до 1,0, тому що $P(X < x_1) = 0$, а $\sum_{i=1}^n P(X = x_i) = 1$.

Вертикальні відрізки графіка точно відповідають цілим числам 0, 1, 2, 3, 4, 5 та 6 – значенням змінної (випадкової) X , водночас усім іншим точкам осі абсцис не відповідають значення змінної X , і над ними розташовуються горизонтальні відрізки графіка. Висота стрибка в кожному аналізованому

значенні розглянутої випадкової величини дорівнює імовірностям здійснення відповідної події. У точці 0 – 0,088; у точці 1 – 0,088 + 0,263 = 0,351; у точці 2 – 0,351 + 0,32 = 0,671 і т.д. до 1. Фізично зазначене підсумовування імовірностей означає, що під час

проведення ремонту завжди існує імовірність відсутності відмови будь-якого поршня (точка 0).

Імовірність відмови тільки одного поршня з будь-яких шести 0,351 (точка 1). Імовірність відмови одного або двох поршнів 0,671 (точка 2). Імовірність відмови одного, двох або трьох поршнів 0,901 (точка 3). Якщо ми розглядаємо точку 6, де імовірність здійснення події дорівнює 1, то це означає, що під час проведення ремонту завжди існує імовірність відмови одного, двох, трьох і більше поршнів. Таким чином, функцію $F(x_i)$ можна уявити собі як сумарну (загальну) імовірність появи значень аж до x_i .

Розглянута функція $F(x_i)$ як сума $P(X \leq x_i)$ називається розподілом *накопиченої імовірності* або «*функцією розподілу*» випадкової величини.

2.4.2. Розподіли безперервних випадкових величин

Спроба застосувати ряд розподілу для опису безперервної випадкової величини X зустрічає одразу ж складність, спричинену тим, що така величина може набути незліченного, нескінченно великого числа можливих значень. Якщо позначити імовірність прийняття випадковою величиною X конкретного значення $P(X=x)$ і спробувати її обчислити, то виникає логічний парадокс.

Приймемо, що $P(X=x_i) \neq 0$, тоді $P(X=x) = \infty > 1$, тому що хоч би якою малою була імовірність $P(X=x)$, додавання їх нескінченно числа дасть у сумі ∞ . З іншого боку, якщо $P(X=x) = 0$, то, здавалося б, і $\sum_x P(X=x) = 0$. Однак останнє твердження невірне, оскільки підсумовування проводять за незліченною множиною точок x .

Ці труднощі можна обійти, розглянувши імовірність того, що значення X міститься в деякому малому інтервалі dx

$$P(x \leq X \leq x + dx) > 0. \quad (2.33)$$

Цю імовірність можна виразити через різницю накопичених імовірностей

$$\begin{aligned} P(x \leq X \leq x + dx) &= P(0 \leq X \leq x + dx) - P(0 \leq X \leq x) = \\ &= F(x + dx) - F(x) = dF(x, dx). \end{aligned} \quad (2.34)$$

Оскільки розглядають безперервну випадкову величину, то накопичена імовірність також буде безперервною, і її приріст за інтервал dx можна виразити як

$$dF(x) = f(x)dx, \quad (2.35)$$

тобто як добуток деякої швидкості $f(x)$ на величину інтервалу dx .

Отже,

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \geq 0 \quad (2.36)$$

характеризує швидкість наростання накопиченої імовірності $F(x)$ у кожній точці x , а добуток $f(x)dx$ – приріст $dF(x)$ цієї імовірності за інтервал dx . Підсумовування таких приростів на всьому діапазоні зміни X враховує всі можливі її значення, тобто імовірність того, що випадкова величина X набуде значення в межах $(0 \leq X \leq \infty)$, що дорівнює одиниці

$$P(0 \leq X \leq \infty) = \int_0^{\infty} dF(x) = \int_0^{\infty} f(x)dx = 1. \quad (2.37)$$

Уведена у вигляді (2.36) функція $f(x)$ називається *густиною розподілу* безперервної випадкової величини X або *диференціальною формою закону розподілу*, а $F(x)$ – *функцією розподілу* або *інтегральною формою закону розподілу*.

На рис 2.6 показано характерні графіки функцій $F(x)$ і $f(x)$ для загального випадку, коли випадкова величина може набувати й від'ємних значень, тобто розподілена в діапазоні $(-\infty \leq X \leq \infty)$.

З визначення та фізичного сенсу функції розподілу

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = P(-\infty \leq X \leq x) \quad (2.38)$$

впливають її основні властивості:

1. $F(-\infty) = 0$; $F(+\infty) = 1$ – на підставі (2.37);

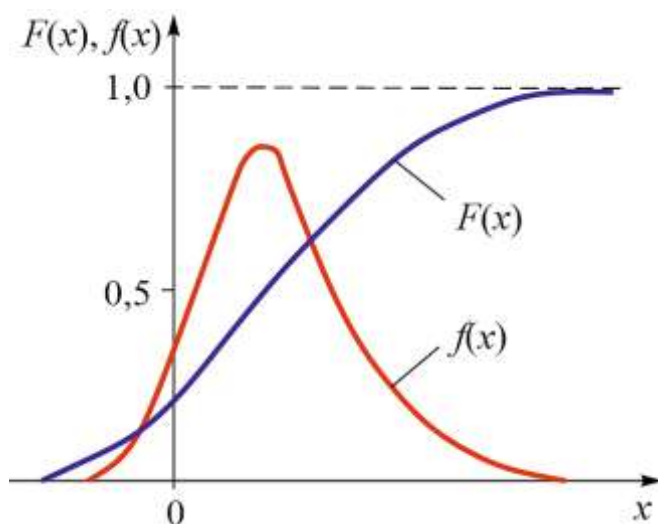


Рис. 2.6. Графіки функції та густини розподілу

2. $F(x_1) \leq F(x_2)$, якщо $x_1 < x_2$, тобто $F(x)$ є додатною неспадаючою функцією;

3. $F(x_2) - F(x_1) = P(x_1 \leq X \leq x_2)$, тобто різниця між значеннями функції розподілу при $X = x_2$ та $X = x_1$ ($x_2 > x_1$) дорівнює імовірності потрапляння X в інтервал (x_1, x_2) .

Густина розподілу відповідно до визначення (2.36) є першою похідною функції розподілу, тобто

$$f(x) = F'(x) \quad (2.39)$$

і має такі властивості:

– густина розподілу є невід'ємною функцією, тобто $f(x) \geq 0$ на всьому діапазоні можливих значень X ;

– інтеграл від $f(x)$ на межах усього діапазону можливих значень X дорівнює одиниці, тобто

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = F(+\infty) = P(X \leq \infty) = 1. \quad (2.40)$$

Вираз (2.40) називається умовою нормування закону розподілу;

– імовірність потрапляння X в інтервал (x_1, x_2) визначається як

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = F(x_2) - F(x_1). \quad (2.41)$$

Густина розподілу на відміну від безрозмірних імовірності та функції розподілу є розмірною величиною. Її розмірність обернена розмір-

ності аналізованої випадкової величини X (якщо, наприклад, випадкова величина X вимірюється в метрах або годинах, то $f(x)$ вимірюється в м^{-1} або год^{-1} , відповідно).

У теорії імовірностей розглядають велику кількість різноманітних законів розподілу¹, що описують поведінку різних випадкових величин, що мають місце в природі, техніці, економіці. При цьому форма, структура, параметри закону розподілу визначаються умовами процесу або явища (тобто досліду), у яких реалізується випадкова величина (тобто можливий результат досліду).

Формування законів розподілу безперервних випадкових величин можна розглянути на прикладі диска, окружність якого рівномірно й безперервно калібрована від 0 до 1, як показано на рис. 2.7.

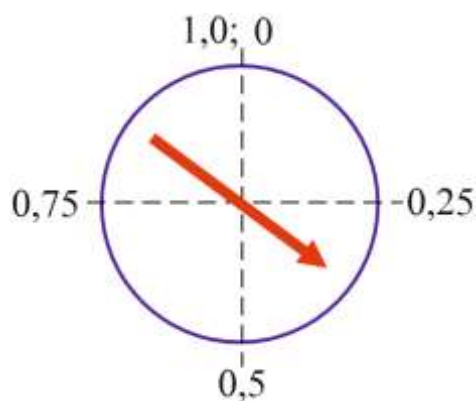


Рис. 2.7. Схема проведення досліду

У центрі диска укріплено вісь, на якій у горизонтальній площині може вільно обертатися стрілка. Як змінну X використовуємо значення, на які вказує стрілка в момент її зупинки після обертання. Стрілка вважається незміщеною і тому може зупинитися в будь-якому можливому положенні. У цьому випадку легко отримати уявлення про вигляд функції розподілу імовірностей. Так, $F(x = 0,5) = 0,5$, оскільки є тільки один шанс із двох, що стрілка зупиниться у правому півколі; аналогічно, $F(x = 0,25) = 0,25$, тому що є лише один шанс із чотирьох, що стрілка залишиться в першій чверті кола; так само $F(x = 0,75) = 0,75$, отже, виявляється закономірність, яку можна описати в такий спосіб:

$$F(x) = x \text{ за } 0 \leq x < 1;$$

$$F(x) = 0 \text{ за } x < 0;$$

$$F(x) = 1 \text{ за } x \geq 1.$$

¹ Закон розподілу випадкової величини – це будь-яке співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини та відповідними їм імовірностями.

Таким чином, у розглянутому випадку імовірності накопичуються безперервно і функція $F(x)$ подається у вигляді прямої, показаної на рис. 2.8, а).

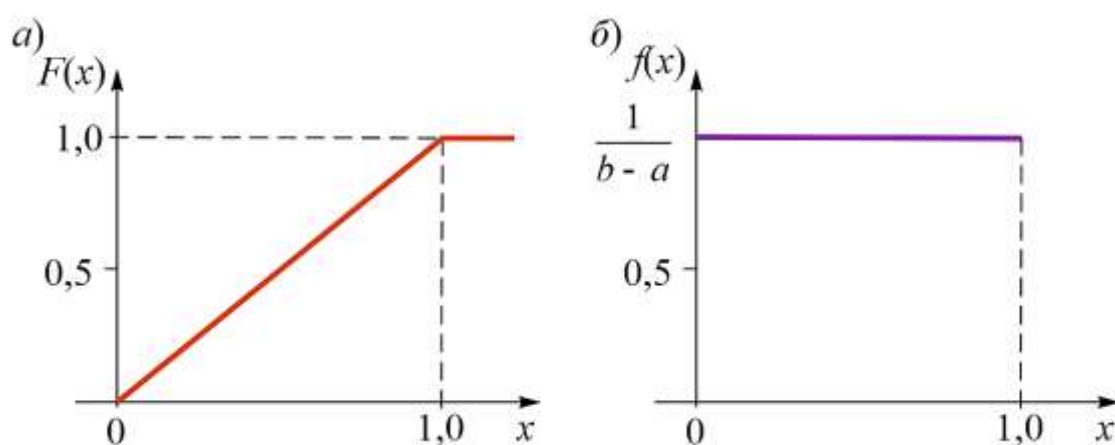


Рис. 2.8. Графіки $F(x)$ і $f(x)$ для випадку рівномірного розподілу

Щоб одержати функцію густини імовірностей $f(x)$ безперервної випадкової величини з функції розподілу імовірностей $F(x)$, останню необхідно продиференціювати. Для розглянутого випадку на рис. 2.8, б) видно, що функція густини імовірностей $f(x)$ має одне й те саме значення в кожній точці відрізка $[0,1]$. Це й зрозуміло, оскільки однаково правдоподібною є зупинка стрілки в будь-якій точці розглянутого інтервалу.

Якщо всі можливі значення X лежать в інтервалі від a до b і при цьому рівноімовірні, як у розглянутому нами випадку, то виходить *рівномірний* (прямокутний) розподіл. Густина імовірності цього розподілу в загальному вигляді записується як

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } -\infty < x < a, \\ \frac{1}{b-a}, & \text{при } a < x < b, \\ 0, & \text{при } b < x < +\infty. \end{cases} \quad (2.42)$$

Функція розподілу (накопичена імовірність)

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } -\infty < x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{при } a < x < b, \\ 0, & \text{при } b < x < +\infty. \end{cases} \quad (2.43)$$

Рівномірний розподіл вважається двопараметричним, оскільки a і b є параметрами розподілу. У цьому випадку $a = 0$, $b = 1$.

Це був найпростіший випадок, коли функція накопичення імовірностей лінійна. У практиці розрахунків такий випадок накопичення імовірностей є рідкісним винятком.

У теорії надійності технічних об'єктів основними величинами, що визначають рівень їхньої надійності, є час або інші показники – тривалість роботи до відмови t . Закони розподілу цих тривалостей формуються під впливом безлічі чинників, що мають випадкову природу: розкиду властивостей матеріалу деталей і якості їхнього виготовлення та складання; розкиду параметрів, що характеризують внутрішні навантаження і режими роботи (сили, тиску, вібрації, температури), а також розкиду показників зовнішніх умов експлуатації. Відповідно до того чи іншого поєднання зазначених факторів проявляться різні закони розподілу тривалості роботи t до відмови. Якщо технічний об'єкт розрахований на певний термін служби, то на початку експлуатації, за невеликого періоду напрацювання імовірність його відмови невелика (якщо не враховувати так звані припрацьовочні відмови¹). Потім, зі збільшенням напрацювання, починають проявлятися дестабілізуючі фактори (знос, старіння, втома матеріалу, корозія тощо) і імовірність відмови починає швидко збільшуватися. При досягненні напрацювання, близького до встановленого ресурсу, залишаються працездатними тільки високоякісні об'єкти, імовірність виходу з ладу яких невелика, й інтенсивність зміни кривої накопичення імовірностей $F(t)$ різко сповільнюється.

Графічно зазначений процес нелінійної зміни функції $F(t)$ у міру збільшення наробітку t технічного об'єкта представлено на рис. 2.9, а). Оскільки густина імовірності $f(t)$ є першою похідною від $F(t)$ та характеризує граничну імовірність кожного значення наробітку t , то графік функції $f(t)$ матиме «колоподібну» форму з максимумом, відповідним до наробітку $f(t)$, за якого виявлено найбільшу імовірність виходу виробів з ладу (див. рис. 2.9, б).

¹ Припрацьовочні відмови – це відмови, що виникають на початковому етапі експлуатації, коли нові вузли та деталі ще притираються і адаптуються до робочих умов.

Для теоретичного опису розглянутих вище тенденцій у практиці аналізу надійності різноманітних технічних об'єктів та їхніх елементів набули поширення *нормальний* розподіл (Гауса), *експоненційний* (показниковий) закон розподілу, закон розподілу *Ерланга*, закон розподілу *Релея*, закон розподілу *Бейбула-Гнеденка*, *гамма-розподіл*, *логарифмічно-нормальний* закон розподілу, які докладно розглядаються далі.

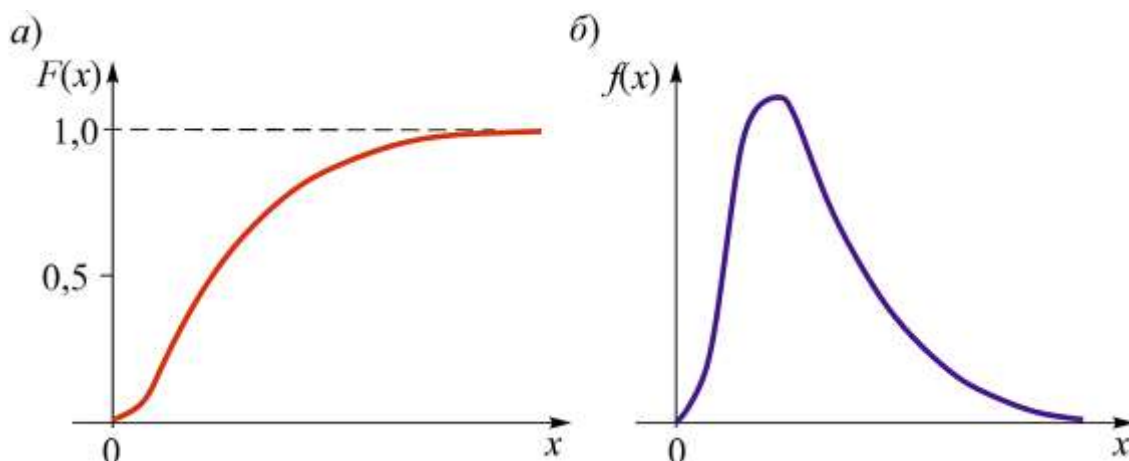


Рис. 2.9. Графіки зміни $F(t)$ і $f(t)$ для випадку напрацювання деталей до відмови

2.5. Числові характеристики розподілів імовірностей випадкових величин

Закон розподілу імовірностей є найповнішою характеристикою випадкової величини. Однак для розв'язання практичних завдань, пов'язаних із визначенням основних числових характеристик надійності технічних систем, під час проведення експрес-аналізу статистичних даних спостережень або експериментів часто не потрібно знати аналітичні вирази законів розподілу випадкових величин, а достатньо мати деякий набір числових характеристик, які дають уявлення про діапазон можливих значень, середнє значення, найімовірніше значення, ступінь розсіювання випадкових величин.

Найчастіше в теорії імовірностей розглядають такі числові характеристики розподілів імовірностей: квантілі, характеристики положення, характеристики розсіювання, характеристики асиметрії й ексцесу.

Квантилем називають значення випадкової величини, яке відповідає заданій або визначеній імовірності. Слово квантиль походить від англійського *quantile* і вживається в математичній статистиці для позначення значення, яке розділяє розподіл імовірностей на певні частини. Квантиль порядку p є таке значення x_p випадкової величини x , для якого

$$P(x < x_p) = F(x_p) = p, \quad (0 < p < 1). \quad (2.44)$$

Наприклад, квантиль порядку $p = 0,5$ називається медіаною розподілу. Медіана $x_{0,5}$ відповідає значенню функції розподілу $F(x_{0,5})$ або, що те саме, ділить площу під кривою густини розподілу $f(x)$ на дві рівні частини. До характеристик положення належать:

- центр розподілу (або математичне сподівання) $M[X] = x_m$;
- медіана – це значення випадкової величини, яке ділить розподіл імовірностей на дві рівні частини (0,5-квантиль) – $x_{0,5}$;
- мода¹, тобто значення x , відповідне максимальному значенню $f(x)$ для безперервного розподілу або найбільшому значенню p_i для дискретного розподілу.

До характеристик розсіювання належать:

- дисперсія² $D[X] = S_x^2$;
- середнє квадратичне відхилення S_x ;
- коефіцієнт варіації³ v_x .

Асиметрію та ексцес розподілу оцінюють коефіцієнтами асиметрії та ексцесу. Асиметрія розподілу – це міра, яка показує, наскільки розподіл випадкової величини є симетричним відносно свого середнього значення. Вона описує, чи є хвости розподілу більш «важкими» або «розтягнутими» в один бік. Ексцес розподілу – це міра того, наскільки «гостровершинним» або «плосковершинним» є розподіл у порівнянні з нормальним (гаусовим) розподілом.

¹ Мода – це значення випадкової величини, яке трапляється з найбільшою частотою. Іншими словами, це те значення, яке має найвищу імовірність появи в розподілі.

² Дисперсія – це міра розсіювання випадкової величини відносно її математичного сподівання. Вона показує, наскільки значення величини в середньому відхиляються від середнього значення.

³ Коефіцієнт варіації – це безрозмірна міра розсіювання випадкової величини, яка показує, наскільки сильно змінюються значення відносно середнього. Його використовують для порівняння ступеня варіативності різних вибірок, навіть якщо вони мають різні одиниці вимірювання або середні значення.

Серед перерахованих числових характеристик найбільше застосування в практиці імовірісно-статистичних розрахунків одержали математичне сподівання (центр розподілу) як основна характеристика положення і характеристики розсіювання. Для їх визначення використовують так звані моменти розсіювання, що являють собою центри розподілу степеневих функцій $M[X^n]$ або $M[(X-x_m)^n]$, де $n = (1, 2, \dots, n)$ – порядок моменту.

Центр розподілу $M[X^n]$ називається початковим моментом n -го порядку, центр розподілу $M[(X-x_m)^n]$ – центральним моментом n -го порядку. З усього різноманіття моментів розглянемо початковий момент першого порядку $M[X]$ і центральний момент другого порядку $M[(X-x_m)^2]$. Початковий момент першого порядку розподілу є математичним сподіванням або середньозваженим значенням випадкової величини і обчислюється за формулами:

а) для дискретної випадкової величини

$$M[X] = x_m = \sum_{i=1}^n x_i p_i; \quad (2.45)$$

б) для безперервної випадкової величини

$$M[X] = x_m = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx. \quad (2.46)$$

Математичне сподівання вимірюється в тих самих одиницях, що й випадкова величина, і має такі властивості:

– якщо c – постійне число, то

$$M[c] = c, \quad M[cX] = cM[X] = cx_m; \quad (2.47)$$

– якщо X і Y – випадкові величини, то

$$M[X + Y] = M[X] + M[Y] = x_m + y_m; \quad (2.48)$$

– якщо X і Y – незалежні випадкові величини, то

$$M[XY] = M[X] \cdot M[Y] = x_m \cdot y_m. \quad (2.49)$$

Центральний момент другого порядку розподілу є дисперсією випадкової величини і визначається за формулами:

а) для дискретної випадкової величини

$$M[(X - x_m)^2] = D[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 p_i; \quad (2.50)$$

б) для безперервної випадкової величини

$$M[(X - x_m)^2] = D[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x_i - x_m)^2 f(x) dx. \quad (2.51)$$

Різниця $X - x_m = \overset{\circ}{X}$ називається центрованою випадковою величиною. З урахуванням цього можна сказати, що дисперсія розподілу є математичне сподівання квадрата центрованої випадкової величини $\overset{\circ}{X}$.

Дисперсія має такі властивості:

– якщо c – постійне число, то

$$D[c] = 0, \quad D[cX] = c^2 D[X]; \quad (2.52)$$

– якщо X і Y – незалежні випадкові величини, то

$$D[X + Y] = D[X] + D[Y]. \quad (2.53)$$

Дисперсія вимірюється у квадратних одиницях виміру самої випадкової величини та оцінює ступінь її розсіювання відносно центру розподілу, тобто математичного сподівання. У практичних імовірнісно-статистичних розрахунках для цієї ж мети часто застосовують середнє квадратичне відхилення, що визначається за формулою:

$$S_x = \sigma_m = \sqrt{D[X]}, \quad (2.54)$$

яке вимірюється в тих же одиницях, що і сама випадкова величина. У низці випадків застосовується відносна оцінка розсіювання випадкової величини, яка називається коефіцієнтом варіації та визначається за формулою:

$$v_x = S_x / x_m. \quad (2.55)$$

2.6. Короткі відомості про статистичні методи опрацювання експериментальних даних

Основним завданням математичної статистики є розроблення методів одержання науково обґрунтованих висновків про масові явища та процеси з аналізу даних спостережень або експериментів, у т.ч. виробничих експериментів. Ці висновки стосуються не окремих випробувань, а являють собою твердження про загальні імовірнісні характеристики досліджуваного процесу, тобто про імовірності, закони розподілу, математичні сподівання аналізованих величин, їхні дисперсії тощо. Об'єктивними ці дані будуть тільки в тому разі, якщо вони розраховані на основі спостережень за експлуатацією об'єктів, що становлять генеральну сукупність. Генеральну сукупність становить повна множина однотипних об'єктів, що мають певні властивості. Прикладом генеральної сукупності можуть слугувати, наприклад, усі тягові двигуни вантажних локомотивів однієї серії, що експлуатуються на даній ділянці в конкретних умовах.

Однак у більшості випадків неможливо одержати відомості про всі елементи множини, яка становить генеральну сукупність. Тому зазвичай використовують випадкову вибірку. Маючи в своєму розпорядженні певну конкретну (часто обмежену за обсягом) інформацію, наприклад, про напрацювання до відмови групи технічних об'єктів, можна на основі застосування статистичних методів зробити більш загальні, досить обґрунтовані висновки щодо показників надійності всіх об'єктів цього типу, а також якості їх виготовлення, досконалості технологічного процесу. Однак при цьому слід мати на увазі, що отримані за результатами таких спостережень за групою об'єктів висновки й оцінки відображають випадковий склад об'єктів групи і тому є наближеними. Застосовуючи методи математичної статистики, наприклад, вибіркового методу, можна використати отриману інформацію і на підставі дослідження вибіркової сукупності одержати досить достовірні оцінки кількісних показників, із зазначенням при цьому і ступеня достовірності. У цьому й полягає наукова цінність статистичних методів та їхня практична значущість.

Поняття про згаданий вибіркового методу, його основні характеристики є одними з основних у математичній статистиці. Вибірковий метод базується на результатах, що впливають із закону великих чисел, нерівності Чебишева, центральної граничної теореми Ляпунова.

Суть вибіркового методу полягає в тому, що випробуванню піддають не всю сукупність певних об'єктів, тобто *генеральну сукупність*, а лише деяку її частину, яка називається *вибірковою сукупністю* (або *вибіркою*), що складається з елементів, відібраних ненавмисно, випадковим чином. Вибірка має бути *репрезентативною*¹, тобто пропорції її об'єктів різних підвидів у середньому мають відповідати пропорціям, які мають місце в генеральній сукупності.

Параметри, які вичерпно характеризують генеральну сукупність, можна одержати тільки на підставі використання повністю всіх даних про неї. Якщо ж використовуються дані випадкової вибірки, то отримують *статистичні оцінки* параметрів генеральної сукупності.

Випадковий і незалежний відбір n значень величини X з генеральної сукупності дає деяку вибірку послідовність $x_1, x_2, \dots, x_n$, що є сукупністю n однаково розподілених незалежних випадкових величин $X_1, X_2, \dots, X_n$. У цьому разі вважають, що вибірка $x_1, x_2, \dots, x_n$, узята з генеральної сукупності величини X , тобто вибірка являє собою n екземплярів однієї й тієї самої випадкової величини X , що зустрічається n послідовних і незалежних спостереженнях. Генеральна сукупність у загальному випадку може бути і нескінченно великою за об'ємом N (за кількістю об'єктів або ознак), і кінцевою. У будь-якому разі чим більший обсяг n вибірки, тим більш обґрунтоване судження можна висловити про властивості генеральної сукупності.

Маючи в своєму розпорядженні інформацію про характеристики вибірки випадкових величин, можна побудувати емпіричну функцію розподілу, гістограму та розрахувати відповідні оцінки емпіричного розподілу.

Нехай x – деяка точка осі X ; позначимо через n_x кількість вибірових значень, розташованих лівіше за x на тій самій осі. Отже, відношення n_x/n представляє частоту спостережень у вибірці значень випадкової величини X , менших, ніж x . Ця частота, очевидно, є функцією x , позначається $W_n(x)$ і називається функцією розподілу вибірки або емпіричною функцією розподілу. Таким чином,

$$W_n(x) = n_x/n \quad (2.56)$$

¹ Репрезентативна вибірка – це підмножина генеральної сукупності, яка точно відображає її основні характеристики. Така вибірка зберігає пропорції, структуру та варіацію досліджуваної генеральної сукупності, дозволяючи робити обґрунтовані узагальнення про всю сукупність.

є оцінкою імовірності нерівності $X < x$, тобто теоретичної функції розподілу $F(x) = P(X < x)$ випадкової величини X , або, інакше кажучи, функції розподілу генеральної сукупності.

Якщо сукупність n значень випадкової величини розташовано в порядку зростання $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, то виходить *варіаційний ряд* n реалізацій випадкової величини. Розділивши розмах значень цього ряду ($x_n - x_1$) на певну кількість однакових інтервалів, зазвичай у межах 7...13, отримуємо інтервальний варіаційний ряд.

Для інтервального варіаційного ряду емпірична функція розподілу має вигляд зростаючої ступінчастої кривої. Ординати функції $\bar{F}(x)$, що відповідають кінцю кожного інтервалу розбивки, характеризують сумарну величину частот, накопичених на всіх попередніх інтервалах, включно з інтервалом, який ми розглядаємо.

Гістограма є графічним представленням статистичної частоти (емпіричної імовірності) інтервального варіаційного ряду. Для побудови гістограми над кожним інтервалом розбивки будуються прямокутники, висотою

$$\bar{f}(x_i) = \frac{m_i}{h_i n}, \quad (2.57)$$

де m_i – кількість членів вибірки, які потрапили в певний інтервал;
 h_i – довжина інтервалу.

Побудована таким чином гістограма називається *гістограмою відносних частот*. Площа гістограми, зосереджена у всіх інтервалах, дорівнює сумі відносних частот розбиття, тобто одиниці. На відміну від істинних числових характеристик (параметрів) генеральної сукупності, одержані вибіркові статистичні оцінки позначаються верхньою горизонтальною рисою, наприклад, $\bar{F}(x)$, $\bar{f}(x)$, $\bar{x}$, $\bar{S}$ і так далі. Якщо деяку статистичну оцінку $\bar{\phi}$ отримано на підставі результатів дослідів або спостережень $x_1, x_2, \dots, x_n$, але вона не залежить від невідомих параметрів, то вона називається *точковою*. *Незміщеною* оцінкою параметра ϕ буде така оцінка $\bar{\phi}$, у якої математичне сподівання збігається з параметром незалежно від кількості дослідів або спостережень, тобто за будь-якого n

$$M[\bar{\phi}(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \phi. \quad (2.58)$$

Якщо такий збіг наявний за $n \rightarrow \infty$, то оцінка буде *асимптотично незміщеною*.

Слушна оцінка (*спроможна, узгоджена, конзистентна*) $\bar{\varphi}$ – це така точкова оцінка, що збігається за імовірністю з оцінюваним параметром φ при $n \rightarrow \infty$, тобто

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\varphi - \bar{\varphi}| > \varepsilon) = 0, \quad (2.59)$$

де $\varepsilon > 0$ – достатньо мала величина.

Оцінку $\bar{\varphi}$ вважають *ефективною* відносно параметра φ , якщо значення її дисперсії буде мінімальним з усіх можливих значень дисперсій оцінки $\bar{\varphi}$ відносно параметра φ . Оцінка $\bar{\varphi}_1$ є ефективнішою за оцінку $\bar{\varphi}_2$, якщо

$$M|(\bar{\varphi}_1 - \varphi)^2| < M|(\bar{\varphi}_2 - \varphi)^2|. \quad (2.60)$$

Оцінку $\bar{\varphi}$ називають *достатньою*, якщо всі інші незалежні оцінки, отримані за даною вибіркою, не дають будь-якої додаткової інформації про оцінювані параметри.

Для емпіричної вибірки обчислюють характеристики центру групування і характеристики розсіювання. Ці характеристики будуть емпіричними або вибірковими характеристиками, отриманими зі спостереження. Оскільки $W_n(x)$ вважається оцінкою за вибіркою функції розподілу $F(x)$ генеральної сукупності, то природно вважати і вибіркові числові характеристики оцінками для відповідних числових характеристик випадкової величини X . Так, наприклад, середнє значення вибірки

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.61)$$

вважається оцінкою математичного сподівання $M(x)$ випадкової величини X .

У якості оцінки для характеристики розсіювання значень генеральної сукупності, тобто дисперсії $D(x)$, застосовується вибіркова характеристика

$$\bar{S}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.62)$$

тобто середнє арифметичне квадратів відхилень. Оцінка $\bar{S}^2$ називається виправленою, є незміщеною і спроможною. При $n > 30$ використовується скоригована формула (2.62)

$$\bar{S}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

Величина середнього квадратичного відхилення $\bar{S}$ дорівнює

$$\bar{S}_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.63)$$

У разі $n > 30$

$$\bar{S}_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Приклад 2.7. У табл. 2.3 наведено дані про напрацювання до відмови 100 тягових електродвигунів. Необхідно побудувати емпіричні функції розподілу і розрахувати основні статистичні характеристики напрацювань тягових електродвигунів до відмови.

Розв'язання. На підставі статистичних даних, згрупованих у стовпчиках табл. 2.3 у вигляді інтервального ряду, розраховують відповідні значення і будують функції $\bar{F}(x)$ і $\bar{f}(x)$, як показано на рис. 2.10 і 2.11.

За формулами (2.61 – 2.63) визначають вибіркові значення для середнього, дисперсії, середнього квадратичного відхилення і коефіцієнта варіації напрацювання тягових електродвигунів до відмови:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_1^{100} n_i x_i = 290 \cdot 10^3 \text{ км}; \quad \bar{S}^2 = \frac{1}{n} \sum_1^{100} n_i (x_i - \bar{x})^2 = 2,2 \cdot 10^{10} \text{ км}^2;$$

$$\bar{S}_x = \sqrt{\bar{S}^2} = 148 \cdot 10^3 \text{ км}; \quad v_x = \frac{\bar{S}_x}{\bar{x}} = \frac{148 \cdot 10^3}{290 \cdot 10^3} = 0,51.$$

Знайдені за (2.61–2.63) оцінки можуть відрізнятися від параметрів розподілу на деяку величину Δ . Доведено теоретично і підтверджено практикою імовірісно-статистичних розрахунків, що в разі збільшення об'єму вибірки n відхилення Δ зменшується, тобто точність

оцінок, які розраховують, підвищується, інакше кажучи, звужується довірчий інтервал.

Таблиця 2.3

**Дані спостережень про кількість відмов тягових електродвигунів
в інтервалі наробітку 0...800 тис. км**

№ п/п	Інтервал наробітку	Частота відмов, n_i	$\bar{F}(x) = \frac{1}{n} \sum m_z$	$\bar{f}(x) = \frac{m_i}{h_i n} \cdot 10^{-5}$
1	0...100	6	0,06	0,06
2	101...200	26	0,32	0,26
3	201...300	25	0,57	0,25
4	301...400	22	0,79	0,22
5	401...500	11	0,90	0,11
6	501...600	7	0,97	0,07
7	601...700	2	0,99	0,02
8	701...800	1	1,00	0,01
		100		1,00

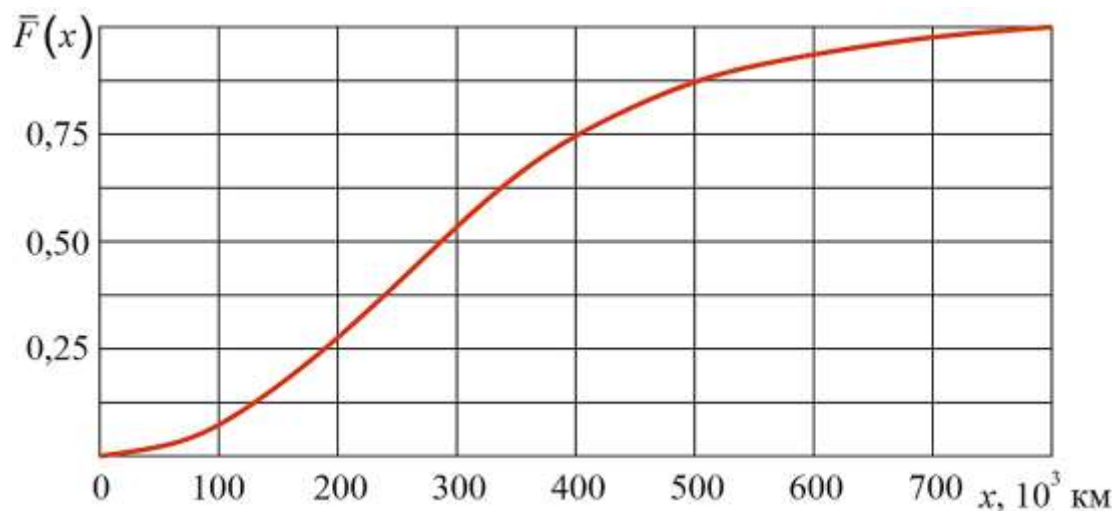


Рис. 2.10. Графік функції розподілу напрацювання
тягових двигунів ЕД-117 до відмови

При цьому кожному значенню вибірки n і заданому довірчому інтервалу Δ відповідає деякий ступінь упевненості, оцінюваний імовірністю

$$P(|\bar{x} - M[X]| < \Delta) = \gamma \quad (2.64)$$

того, що оцінка $\bar{x}$ відхилиться від математичного сподівання $M[X]$ на величину, не більшу за Δ .

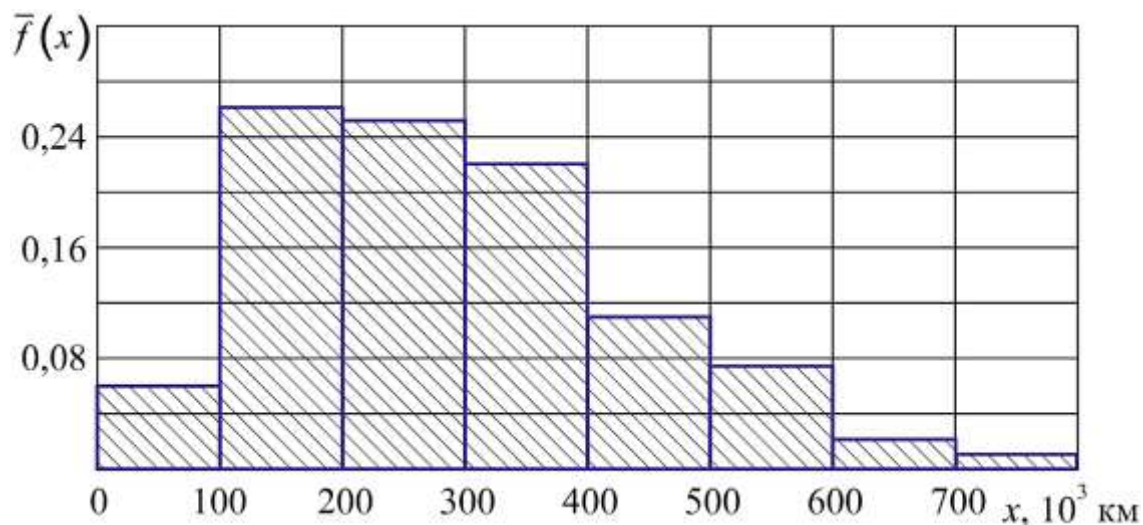


Рис. 2.11. Гістограма варіаційного ряду напрацювання тягових електродвигунів ЕД-117 до відмови

Запитання до самоконтролю

1. Що вивчає теорія імовірностей і які закономірності вона описує?
2. Яка основна роль математичної статистики у вивченні випадкових процесів?
3. Назвіть три типи взаємовідносин теорії імовірностей і математичної статистики з фізикою та інженерними науками.
4. Чому результати спостережень і вимірювань розглядають як випадкові величини?
5. Як будується теорія імовірностей: дедуктивно чи індуктивно?
6. У чому полягає різниця між елементарною теорією імовірностей і розширеною теорією для нескінченного числа результатів?
7. Чому без знання теорії імовірностей неможливо правильно поставити завдання теорії надійності?
8. Які випадкові фактори впливають на тривалість роботи технічного об'єкта?
9. Чому навіть за ідеальних виробничих умов неможливо точно передбачити термін служби виробу?
10. Як математичні методи теорії імовірностей допомагають керувати процесами створення та експлуатації технічних об'єктів?
11. Що таке елементарна подія у імовірнісній моделі? Як її позначають?

12. Які події називаються несумісними? Наведіть приклад.
13. Що означає «повна група подій»? Наведіть приклад.
14. Чим відрізняється випадкова величина від детермінованої?
15. У чому різниця між дискретною та безперервною випадковою величиною?
16. Чому тривалість роботи машини до відмови є безперервною випадковою величиною?
17. Як функція від випадкової величини може теж бути випадковою величиною? Поясніть на прикладі швидкості зношування.
18. Що таке випадковий процес і яка змінна зазвичай використовується як аргумент у прикладних задачах?
19. Які основні підходи до визначення імовірності згадуються в тексті?
20. Що таке апіорна імовірність? Як вона визначається?
21. Що означає «повна група подій»? Як це пов'язано з визначенням імовірності?
22. Як можна сформулювати імовірність події, якщо відомі умови досліду та рівноможливі події?
23. Яка імовірність витягування білої кулі з урни, що містить 10 білих і 15 чорних куль?
24. Що таке апостеріорна імовірність і як вона оцінюється?
25. Як можна оцінити імовірність події, якщо невідома загальна кількість куль в урні?
26. Яку роль відіграє повторення досліду N разів при оцінці імовірності?
27. Яке твердження впливає з центральної граничної теореми?
28. Як визначається імовірність події при нескінченному збільшенні кількості дослідів?
29. Що означає «асимптотично» у контексті наближення імовірності до 0,5?
30. Як можна пояснити коливання графіка зміни частоти повторення подій, що наведений на рис. 2.1 на початкових етапах досліджень?
31. У чому полягає різниця між сумою та добутком подій у теорії імовірностей?
32. Як можна інтерпретувати геометрично суму і добуток подій за допомогою множин?
33. Чому при додаванні імовірностей потрібно віднімати імовірність спільної події $P(A \cdot B)$?

34. У прикладі з гральною кісткою, що зміниться, якщо додати умову на кратність іншому числу?
35. Як узагальнити формулу додавання імовірностей на більше ніж дві події?
36. Чим відрізняються несумісні події (рис. 2.2, а)) від сумісних подій (рис. 2.2, б))?
37. Яку область на рис. 2.2, в) потрібно врахувати, щоб правильно застосувати формулу додавання імовірностей для трьох подій?
38. Чому у випадку трьох подій (рис. 2.2, в)) є область АВС, яка враховується в перехресті всіх трьох множин?
39. Як можна пояснити суму подій $A+B+C$ у контексті реального прикладу, наприклад, з киданням кількох кубиків?
40. Як виглядатиме геометрична інтерпретація для чотирьох подій (рис. 2.2, в))?
41. Що таке теорема множення імовірностей і яке її основне призначення?
42. Як понять, чи є події A_1 та A_2 незалежними?
43. Яка геометрична інтерпретація для суми подій A_1 та A_2 ?
44. Який принцип визначення умовної імовірності, якщо подія A_1 вже відбулася?
45. Що таке формула повної імовірності і в яких випадках її застосовують?
46. Які елементи входять до формули повної імовірності?
47. Яка роль гіпотез $H_1, H_2, \dots, H_n$ у формулі повної імовірності?
48. Як обчислюється імовірність події A за допомогою формули повної імовірності?
49. Яка різниця між $P(H_i)$ та $P(A/H_i)$ у формулі повної імовірності?
50. Що означає повторення дослідів у контексті сучасного виробництва?
51. Як визначають незалежні досліді?
52. У яких випадках імовірність появи події A залишається сталою, а в яких – змінюється?
53. Як обчислюється імовірність того, що подія A станеться рівно m разів у n незалежних дослідіах?
54. Що таке формула Бернуллі та для яких розрахунків вона використовується?
55. Чому обчислення за формулою Бернуллі стають трудомісткими при великій кількості дослідів?
56. Як локальна теорема Лапласа спрощує обчислення імовірностей?

57. У яких випадках використовується формула Пуассона?
58. У чому полягає інтегральна теорема Лапласа і для чого вона використовується?
59. Що таке функція Лапласа і як вона застосовується у розрахунках?
60. Що таке закон розподілу випадкової величини?
61. У яких формах може бути подано закон розподілу випадкової величини?
62. Як виглядає ряд розподілу дискретної випадкової величини у табличній формі?
63. Як використовується біноміальний закон для розрахунку імовірностей?
64. Які висновки можна зробити з багатокутника розподілу імовірностей?
65. Чому сума імовірностей для всіх можливих значень дискретної випадкової величини дорівнює одиниці?
66. Що таке функція розподілу і як вона пов'язана з сумарною імовірністю?
67. Як обчислюється імовірність того, що випадкова величина не перевищує певного значення?
68. Який графічний вигляд має функція накопиченої імовірності?
69. Яка основна складність у використанні ряду розподілу для безперервних випадкових величин?
70. Що таке функція густини імовірностей і як вона пов'язана з функцією розподілу?
71. Які властивості має функція розподілу $F(x)$?
72. Які властивості має функція густини розподілу $f(x)$?
73. Як виглядають графіки функції розподілу та густини імовірностей?
74. Що таке рівномірний розподіл і які його особливості?
75. Як виглядає функція розподілу для рівномірного розподілу?
76. Чому рівномірний розподіл є двопараметричним?
77. Як формується закон розподілу для технічних об'єктів?
78. Чому функція розподілу для часу до відмови технічного об'єкта має нелінійний характер?
79. Які основні закони розподілу використовуються для аналізу надійності технічних систем?
80. Які основні числові характеристики використовують для оцінки розподілу випадкових величин?
81. Що таке квантиль випадкової величини?

82. Як визначається медіана розподілу?
83. У чому відмінність між модою та медіаною?
84. Що таке математичне сподівання і як воно обчислюється?
85. Які характеристики описують розсіювання випадкової величини?
86. Як визначається дисперсія і що вона показує?
87. Що таке середнє квадратичне відхилення?
88. Як обчислюється коефіцієнт варіації і для чого він використовується?
89. Що таке асиметрія розподілу і як вона впливає на форму розподілу?
90. Що означає ексцес у контексті імовірнісного розподілу?
91. Які основні моменти розподілу використовуються для його аналізу?
92. Чим відрізняється початковий момент від центрального моменту?
93. Що є основним завданням математичної статистики?
94. Як статистичні методи допомагають у дослідженні масових явищ?
95. Що таке генеральна сукупність і які її особливості?
96. Чому в реальних умовах зазвичай використовують вибірку сукупність?
97. Яку роль відіграє вибірковий метод у статистичних дослідженнях?
98. Чому вибірка сукупність має бути репрезентативною?
99. Що таке емпірична функція розподілу?
100. Як формується варіаційний ряд вибірових значень?
101. У чому різниця між інтервальним варіаційним рядом і просто варіаційним рядом?
102. Як будується гістограма розподілу вибірки?
103. Що таке точкова оцінка параметра генеральної сукупності?
104. Що означає ефективність статистичної оцінки?
105. Як визначають середнє значення вибірки?
106. Чому виправлена дисперсія є незміщеною оцінкою?
107. Як обчислюється середнє квадратичне відхилення для вибірки?

Фізичні основи надійності

3.1. Класифікація процесів зміни властивостей матеріалів і працездатності елементів

Виникнення відмови являє собою, як правило, певний часовий процес, внутрішній механізм і швидкість якого визначаються структурою та властивостями матеріалу, напруженнями, викликаними навантаженням і температурою. У зв'язку із цим основним напрямом розвитку теорії та практики надійності є поєднання статистичних і імовірнісних методів аналізу та глибокого вивчення фізичних і фізико-хімічних процесів, які призводять до зниження надійності. Тому виникає необхідність у встановленні безпосередньої залежності основних показників надійності від фізичних властивостей і параметрів матеріалів елементів, від фізико-хімічних процесів їхньої зміни та від інтенсивності й випадкового характеру експлуатаційних впливів, що є найзагальнішою причиною відмов елементів.

Унаслідок цього класифікація відмов технічних пристроїв за їхньою фізичною природою відображає, насамперед, фізико-хімічні процеси, які безпосередньо або побічно впливають на працездатність елементів і виникнення відмов, а також умови перебігу процесів. Таку класифікацію відмов можна провести за такими ознаками: типом (класом) матеріалу елемента; місцем протікання процесів, що впливають на працездатність елемента; видом енергії, що визначає характер процесу; типом експлуатаційного впливу; характером (внутрішнім механізмом) процесу. В аналізі причин відмов потрібен врахування взаємного впливу різних процесів, що відбуваються в об'ємі матеріалу елементів на поверхні елементів; у зчленуваннях деталей (нерухомих і рухомих); в електричних колах.

Поряд із фізико-хімічними процесами, що відбуваються в об'ємі твердих тіл, у багатьох випадках вирішальний вплив на працездатність елементів і виникнення відмов чинять процеси на поверхні тіла, що

зазнає безпосередньої дії навколишнього чи робочого агресивного середовища, вологи, забруднень.

Процеси в об'ємі твердого тіла та на його поверхні, що сприяють порушенню працездатності та появи відмов, зазвичай виникають та розвиваються як локальні. До процесів, що передують появі відмов, що протікають у місцях рухомого й нерухомого з'єднання деталей пристроїв, належать різні види механічного й електроерозійного зношування, контактної корозії та інші.

Зміна фактичного стану, властивостей і характеристик елементів зазвичай зумовлена впливом енергії і полягає в перетвореннях одного виду енергії в інший. Для класифікації відмов і процесів їх виникнення найважливішими є такі види енергії: механічна, теплова, електрична, хімічна, електромагнітна.

Кожному виду енергії відповідає певний характер взаємодії між частинками й тілами у відповідних полях. Слід зазначити деякі особливості механічної й теплової енергії та відповідної їм взаємодії.

Механічна взаємодія являє собою безпосередню (шляхом зіткнення) взаємодію між механічними системами. Механічна енергія, тобто енергія вільно рухомої частинки або системи, може підтримуватися не тільки механічними, а й електричними, магнітними, гравітаційними та іншими взаємодіями.

Теплова взаємодія хоча і являє собою у своїй основі ніби механічну взаємодію між хаотично рухомими частинками (молекулами, атомами), проте, будучи результатом сукупної дії багатьох частинок, належить до якісно іншого виду взаємодії, здійснюваної як середня статистична взаємодія систем, що характеризуються різним тепловим станом. Серед перелічених видів енергії (які можна порівнювати за впорядкованістю, тобто спрямованістю руху, концентрацією, здатністю до перетворення і швидкістю перетворення на інші види енергії, здатністю до нагромадження) теплова енергія посідає особливе місце. Усі види енергії можуть перетворюватися безпосередньо або опосередковано на теплову енергію.

Закономірності перетворення одних видів енергії на інші в найзагальнішій формі встановлюються основними законами термодинаміки і статистичної фізики. У термодинаміці та статистичній фізиці розглядають такі найважливіші характеристики енергії речовини, які є термодинамічними функціями її стану: внутрішня енергія E , вільна енер-

гія G , ентальпія¹ H , термодинамічний потенціал Φ , ентропія² S , що пов'язані між собою співвідношеннями

$$G = E - TS; \quad (3.1)$$

$$H = E + PV; \quad (3.2)$$

$$\Phi = G + PV = H - TS, \quad (3.3)$$

де P, V, T – тиск, об'єм та абсолютна температура системи.

Багато фізико-хімічних процесів, пов'язаних із виникненням відмов, є термічно активованими процесами, тобто можуть протікати тільки за певного рівня теплової енергії, причому інтенсивність процесів збільшується під час нагрівання тіла. Теплові процеси відіграють значну, часом вирішальну роль у зміні властивостей і характеристик елементів та їхніх матеріалів, у процесах їхнього руйнування і старіння.

Фактори, що впливають під час експлуатації, спричиняють поступову зміну характеристик і параметрів елементів. За певних значень цих характеристик і параметрів, тобто за їхньої зміни до певного критичного рівня, може статися відмова елемента.

Експлуатаційні впливи можна класифікувати:

а) за умовами виникнення: ті, що визначаються навколишнім середовищем, які впливають на елементи незалежно від того, працюють вони чи вимкнені, і ті, що з'являються тільки в умовах активної роботи елемента. До перших належать вологість, атмосферний тиск, температура довкілля, хімічний склад і забруднення середовища, радіація, електромагнітне поле, гравітаційне поле, мікроорганізми, а також механічні навантаження, можливі під час експлуатації (вібрація, удари). До других відносяться напруга і струм усталених і перехідних режимів, тепло, що виділяється в елементі, механічні навантаження, що виникають у самому робочому елементі (тертя, тиск).

Навколишнє або робоче середовище чинить значний вплив на процеси руйнування матеріалів елементів, їхню міцність, довговічність і стабільність. Галузь технічної фізики, що розвинулася останніми роками, – фізико-технічна механіка матеріалів – встановлює кількісні за-

¹ Ентальпія – це термодинамічна функція стану, яка характеризує кількість теплоти, що міститься в системі при постійному тиску.

² Ентропія – це міра неупорядкованості системи, яка визначає напрямок енергетичних процесів та обмежує їхню ефективність.

кономірності цього впливу, закономірності фізико-хімічної взаємодії матеріалів з навколишнім середовищем, досліджує процеси деформації та руйнування реальних твердих тіл в умовах дії навантажень і робочих середовищ, високих і низьких температур і тисків, електромагнітних полів і радіаційних випромінювань;

б) за впливом на матеріали навколишнього або робочого середовища: адсорбційний¹, дифузійний², хімічний, корозійний, радіаційний, кавітаційний, ерозійний (у випадках кавітації та ерозії на руйнування поверхні матеріалу додатково впливає рух середовища);

в) за видом змін: необоротні (наприклад, під час хімічного розчинення або корозії, під час утворення нових твердих розчинів або хімічних сполук тощо) і оборотні (що спостерігаються, наприклад, під час фізичної адсорбції газів, коли усунення адсорбованих шарів речовини або десорбція відновлюють властивості матеріалів);

г) за характером зміни в часі: постійні або ті, що закономірно змінюються (наприклад, за синусоїдальним законом) упродовж експлуатації пристрою, та такі, що є випадковими функціями часу.

Вплив експлуатаційних факторів пов'язаний з режимом зберігання або активної експлуатації. У пристроях, що піддаються тривалому зберіганню перед експлуатацією, поступова зміна властивостей і характеристик елементів під час зберігання може мати домінантне значення, особливо для елементів, чутливих до впливу таких зовнішніх чинників, як вологість, атмосферний тиск, опромінення, склад і забруднення атмосфери, навколишня температура. Вплив чинників, що діють під час експлуатації, залежить від режиму експлуатації: від того, чи є цей режим безперервним, циклічним, випадковим, повторно-переривчастим, або одноразовим, усталеним чи перехідним.

Внутрішні процеси, що передують відмові або порушенню працездатності елементів технічних пристроїв, можна вичерпно проаналізувати тільки в кожному конкретному випадку залежно від заданих умов експлуатації та режимів роботи елемента, який ми розглядаємо. Однак конкретні процеси порушень працездатності визначають загальними фізико-хімічними змінами структури, властивостей і параметрів елементів, що може слугувати або бути основою для побудови деяких загальних фізичних моделей відмов.

¹ Адсорбція (від лат. *ad* – на, при і лат. *sorbeo* – поглинаю) – вибіркове поглинання речовини з газового чи рідкого середовища поверхневим шаром твердого тіла (адсорбенту).

² Дифузія (лат. *diffusio* – поширення, розтікання, розсіювання, взаємодія) – процес взаємного проникнення молекул або атомів однієї речовини поміж молекул або атомів іншої, що зазвичай приводить до вирівнювання їх концентрацій у всьому займаному об'ємі.

Найзагальніші фізико-хімічні процеси в матеріалах, які можуть бути пов'язані тією чи іншою мірою з виникненням порушень працездатності та відмов, такі: дифузійні процеси в об'ємі й на поверхні твердих тіл; переміщення й скупчення точкових дефектів і дислокацій у кристалічних твердих тілах; флуктуаційний розрив міжатомних зв'язків у металах і сплавах; розрив хімічних зв'язків ланцюгів макромолекул полімерних матеріалів; сорбційні процеси; дія поверхнево-активних речовин; сублімація матеріалів; структурні перетворення у сплавах металів та ін.

Загальні фізичні моделі відмов: деформація і механічне руйнування різних матеріалів елементів (деталей); електричне руйнування (порушення електричної міцності, електричний пробій) діелектричних матеріалів; теплове руйнування (порушення теплової стійкості, перегорання, розплавлення тощо) елементів; електрохімічна корозія; електротермічна ерозія; стирання (зношування) поверхонь деталей; зчеплення (схоплювання) поверхонь деталей, які стикаються; забруднення поверхні та матеріалу елементів і багато інших.

3.2. Закономірності фізико-хімічних процесів у матеріалах елементів і процесів механічного руйнування твердих тіл

Закономірності перебігу фізико-хімічних процесів, що впливають на працездатність елементів технічних пристроїв, визначаються, як правило, тим, що в цих процесах беруть участь тільки ті частки речовини (молекули, атоми, електрони), які володіють енергією не меншою за величину, необхідної для подолання енергетичного бар'єра, що перешкоджає перебігу процесу. Переміщення і перегрупування елементарних частинок, зміна їхнього положення в кристалічній решітці можуть відбуватися лише в тому разі, коли енергія частинок перевищує певний для даного матеріалу рівень, достатній для руйнування зв'язків між частинками.

Мінімальна величина енергії частинок (вільної енергії, що може бути прийнята рівною внутрішній енергії або ентальпії), необхідна для подолання цього бар'єра, називається енергією активації даного процесу. Швидкість процесів залежить від тієї невеликої частки частинок, які мають енергію, що перевищує енергію активації процесу. Частка

таких частинок визначається законами розподілу Максвелла-Больцмана для молекул і атомів і квантових розподілів Бозе-Ейнштейна і Фермі-Дірака для електронів, протонів, фотонів тощо. Ці закони статичної фізики мають імовірнісний характер, що зумовлює імовірнісно-статистичну форму опису моделей відмов.

Загальні закономірності процесів механічного руйнування. Загальноприйнятим класичним уявленням про пластичну деформацію і руйнування матеріалів як про критичні події вважається умова, коли діючі в матеріалі напруження досягають деякої критичної величини $\sigma_{кр}$. Згідно з цими уявленнями, за напружень, менших за межу пружності, пластична деформація взагалі не може розвиватися, а руйнування тіла відбувається (практично миттєво) тільки тоді, коли напруження досягнуть межі міцності. Однак цьому погляду протиставляється інший підхід, згідно з яким руйнування матеріалу розглядається не як критична подія, а як поступовий кінетичний термоактиваційний процес, що розвивається в часі в механічно напруженому матеріалі з моменту докладання до нього навантаження, зокрема меншого за критичне. Руйнування є безактиваційним процесом лише за дуже низьких температур (близьких до абсолютного нуля) або за дії напружень, що дорівнюють межі теоретичної міцності (міцності атомних зв'язків).

Відповідно до цієї кінетичної теорії, деформація і руйнування мають характеризуватися не граничним напруженням, а швидкістю зміни деформації і руйнування, а також довговічністю, тобто часом, що потрібен для руйнування.

Межі пружності, плинності, міцності є з цього погляду лише деякими умовними характеристиками. Швидкість зміни процесів механічного руйнування навантаженого твердого тіла і, відповідно, час до руйнування залежать від структури та властивостей матеріалу тіла, напруження, спричиненого навантаженням, і температури. Запропоновано емпіричні формули, що описують залежність часу до розриву τ (або швидкості руйнування v_{ε}) від цих факторів.

Найбільшого визнання набула встановлена експериментально для багатьох матеріалів (чистих металів, сплавів, полімерних матеріалів, напівпровідників, органічного й неорганічного скла та ін.) залежність між напруженням σ , температурою T і часом τ від моменту докладання постійного механічного навантаження до руйнування зразка

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (3.4)$$

де τ_0 , u_0 , γ – параметри рівняння, що характеризують властивості матеріалів.

Швидкість процесу руйнування

$$v_\varepsilon = \tau^{-1} = \tau_0^{-1} \exp\left(-\frac{u_0 - \gamma\sigma}{RT}\right). \quad (3.5)$$

У рівняннях (3.4) і (3.5), що характеризують кінетичний процес руйнування, величина $u = u_0 - \gamma\sigma$ має сенс енергії активації процесу руйнування, причому u_0 є початковою енергією активації (величиною початкового енергетичного бар'єру) процесу руйнування за умови $\sigma = 0$. Величина u_0 постійна для даного матеріалу в широкій області температур T і не залежить від обробки матеріалу (наклепу, термічної обробки, легування тощо); τ_0 і $\tau_0^{-1} = \omega_0$ – параметри, які збігаються за величиною відповідно до періоду та частоти власних теплових коливань атомів у кристалічній решітці твердого тіла, що дорівнюють 10^{-12} – 10^{-14} с та 10^{12} – 10^{14} Гц. Вони є постійними для металів і сплавів, полімерів, іонних кристалів, не залежать від характеру обробки матеріалу й умов його навантаження; σ – зумовлена механічним навантаженням напруженням в матеріалі, що зменшує початкову енергію активації на величину $\gamma\sigma$.

Таким чином, $\gamma\sigma$ активує процес руйнування і створює спрямованість процесу; γ – структурний коефіцієнт, що визначає ступінь зменшення початкового енергетичного бар'єру під дією прикладеного напруження (характеристика чутливості матеріалу до напруження).

Хоча часова залежність відображає внутрішній механізм руйнування твердих тіл, тому що обумовлена тим, що саме руйнування є процесом, що розвивається в часі, зменшенню міцності навантаженого зразка сприяють побічні процеси, які спричиняються агресивною дією середовища, дією поверхнево-активних речовин.

Таким чином, залежність (3.4) показує, що руйнування може відбуватися за напружень, менших за межу міцності, і що розривне напруження залежить від часу дії прикладеного навантаження і від температури матеріалу.

Процеси механічного руйнування металів і сплавів. Можна вважати встановленим, що в металів температурно-часова залежність міцності, виникнення й розвиток мікротріщин зумовлені, в основному,

двома процесами: розривом міжатомних зв'язків за рахунок теплових флуктуацій і спрямованою дифузією вакансій до тріщин.

Безпосередні вимірювання величин енергії активації руйнування, енергії самодифузії, енергії сублімації для низки металів і сплавів і дослідження характеру їхньої зміни свідчать, що в ділянці великих напружень і температур плавлення, менших за $0,5T_{пл}^{\circ}$ К, відбувається процес руйнування, зумовлений послідовним флуктуаційним розривом атомних зв'язків у кристалічній решітці, і, отже, справедливою є залежність (3.4). В області малих напружень і високих температур діє дифузійний механізм руйнування, заснований на зростанні тріщини через приплив вакансій або утворення вогнищ порушення зв'язків у місці скупчення надлишкового числа вакансій.

Параметри u_0 , τ_0 , γ що входять до (3.4), повністю характеризують у «низькотемпературній» області властивості міцності металів і сплавів у часі (як під час процесів руйнування, так і під час процесів деформації), але є недостатніми для опису цих властивостей під час переходу до «високотемпературної» області, де проявляється новий чинник – дифузійна рухливість атомів, вплив якого на механізм руйнування стає за певних умов переважаючим.

Процеси механічного руйнування полімерних матеріалів. Процеси, що спричиняють руйнування навантаженого полімерного матеріалу, являють собою процеси розриву внутрішньомолекулярних хімічних зв'язків унаслідок теплових флуктуацій, активованих механічними напруженнями. Для полімерних матеріалів температурно-часова залежність міцності (3.4) визначається кінетикою поступового флуктуаційного розриву хімічних зв'язків. Енергія активації процесу руйнування полімерів, що зменшується під дією напруження, відповідає енергії активації термодеструкції. Величина u_0 у (3.4) являє собою енергію активації процесу термодеструкції полімерних ланцюгів у ненапруженому полімері, що дорівнює енергії хімічного зв'язку між атомами в полімерному ланцюжку.

Велике практичне значення має знання закономірностей руйнування складових матеріалів, армованих волокнами. Механізм руйнування цих матеріалів видається таким. Унаслідок того, що дефекти розподілені по довжині волокон, руйнування відбувається в деяких випадкових точках (перетинах) за навантажень, менших за загальне руйнівне навантаження для складеного матеріалу. У місці руйнування волокна виникає концентрація напружень, яка при збільшенні навантаження може викликати появу невеликих місцевих тріщин у сполучно-

му (основному) матеріалі. При подальшому навантаженні суміжні тріщини з'єднуються одна з одною через зсув сполучного матеріалу. І процеси розриву волокон, виникнення місцевих тріщин в основному матеріалі та з'єднання суміжних тріщин тривають безперервно до загального руйнування складеного матеріалу.

Механізм утворення та розвитку тріщин. Локальний характер розриву твердих тіл показує, що кінетика руйнування (і довговічність матеріалу) визначається насамперед розвитком тріщин. Руйнування за тривалої дії навантаження зводиться до поступового зростання мікротріщин до критичного розміру в результаті флуктуаційного розриву атомних зв'язків у вершині (вусі) тріщини. Таким чином, розвиток мікротріщин у напруженому тілі являє собою сутність процесу руйнування. Зазвичай тріщини утворюються після докладання навантаження на різного роду дефектах: включеннях, неоднорідностях, подряпинах, і їхній розвиток займає основну частину часу до розриву (наприклад, у міді 90 % часу до розриву; у пластмасах до 99 % часу витрачається на розвиток видимих тріщин). Тріщини проходять дві стадії: повільного зростання зі зростаючою швидкістю (стадію прискореного зростання), що переважає в часі руйнування, і швидкого зростання з постійною граничною швидкістю, близькою до швидкості звуку в матеріалі. Тривалість цієї стадії становить незначну частку порівняно з тривалістю прискореної стадії та часом розриву тіла.

Час до руйнування залежить від форми та розмірів навантаженого тіла (деталі).

Вплив характеру зміни навантаження. Процеси руйнування матеріалів зводяться, головним чином, до поступового нагромадження локальних дефектів, зростання деформацій, що супроводжуються нагромадженням ослаблень (релаксацією) і тріщин, до поступового необоротного характеру послідовних випадкових одиничних порушень. Незворотність процесу накопичення пошкоджень підтверджується результатами дослідів з перериванням навантаження і подальшим навантаженням; при цьому сумарний час перебування під навантаженням до руйнування в середньому дорівнює довговічності зразків матеріалу за безперервного навантаження.

У разі напруження, що змінюється в часі, – довільної послідовності напружень σ_i , що діють на інтервалах часу Δt_i , кожному з яких відповідає довговічність $\tau(\sigma_i)$ – розрив зразка станеться тоді, коли сума відносних зменшень довговічності (наявного ресурсу) стане дорівнювати одиниці. Для випадку дискретної залежності напружень від часу, коли напруження в окремих інтервалах часу залишається сталим, змінюю-

чись лише під час переходу від одного інтервалу до іншого, умовою руйнування зразка буде

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{\tau(\sigma_i)} = 1; \quad (3.6)$$

якщо напруження є безперервною функцією часу $\sigma(t)$, умова розриву зразка має вигляд

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \quad (3.7)$$

де t_p — час до руйнування зразка;
 $\sigma(t)$ — часовий режим навантаження;
 $\tau[\sigma(t)]$ — довговічність за дане напруження.

Умови (3.6), (3.7) характеризують принцип накладення або підсумовування парціальних (тобто часткових) руйнувань; окремі локальні руйнування підсумовуються аж до граничного стану, коли тріщина досягає критичної величини та відбувається руйнування зразка.

Швидкість навантаження також істотно впливає на механізм руйнування твердого тіла. За повільного збільшення навантаження відбувається пружна деформація, потім пластична течія твердого тіла і, нарешті, його розрив. Повільне зростання механічного напруження може супроводжуватися протіканням вторинних процесів у твердих тілах і відповідними оборотними та необоротними змінами властивостей тіла. За великої швидкості наростання механічного напруження відбувається крихке руйнування більшості матеріалів.

Найхарактерніші пошкодження механічного обладнання, деталей і вузлів рухомого складу наведено в табл. 3.1.

Адсорбційне зниження міцності під дією поверхнево-активних речовин. Процеси руйнування, що протікають у твердому тілі, істотно залежать від його фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Наприклад, встановлено, що довговічність міді та алюмінію у вакуумі до 10^{-5} мм. рт. ст. збільшується відповідно в 20 і 10 разів порівняно з довговічністю у звичайній атмосфері.

Вплив майже всіх активних середовищ починається з адсорбції елементів середовища (молекул або іонів) на поверхні твердого тіла.

Таблиця 3.1

Види руйнувань матеріалу і характер руйнувань деталей

Види руйнування матеріалу	Найменування деталей машин, що піддаються цьому руйнуванню	Характер пошкодження деталей машин	Причини руйнування деталей машин
1	2	3	4
Залишкова деформація	Поверхні кочення бандажів, рейок, напружені болти, судини, підшипники ковзання	Зміна геометричної форми деталі (подовження, вигин, вм'ятини тощо)	Тривала дія змінних контактних, розтягувальних або стискуючих напружень, підвищення температури металу
В'язкий злам	Зв'язки та анкерні болти, несучі елементи мостових ферм і інших просторових конструкцій, напружені болти	Руйнування, що супроводжується значною макропластичною деформацією. Поверхня зламу матова, на місці руйнування є скоси, нерівності, волокнистість	Значні перевантаження внаслідок різкого порушення нормальних умов експлуатації
Крихкий злам	Зварні з'єднання, фасонні деталі, болти, а також валики та пальці з високою твердістю; чавунні відливки	Руйнування при незначній макропластичній деформації (відносне звуження гладких зразків менше 5%). Поверхня зламу перпендикулярна до напрямку максимальних розтягувальних напружень і має кристалічну структуру	Значні ударні навантаження, дефекти термічної обробки, низька якість матеріалу, підвищений вміст фосфору, водню, наявність концентраторів напружень (тріщини), холодноламкість сталі
Втомний злам	Вали, осі, шатуни, болти, зварні з'єднання, що піддаються тривалому впливу багаторазово повторюваних навантажень	Утворення тріщин або руйнування. Поверхня зламу має зони поступового розвитку тріщини, прискореного розвитку зламу і зону доламу	Знижена міцність матеріалу, тривалий вплив знакоперемінного навантаження, циклічних температурних напружень, наявність концентраторів напружень (надрізи, неметалеві включення, мікротріщини)

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
Стирання металевих пар	Підшипники ковзання, вали, осі, напрямні, крейцкопфи, куліси, ланцюгові передачі, поршневі кільця і втулки та інші деталі	Поступова зміна геометричних розмірів деталі	Тривале тертя сполучених поверхонь
Втомне вишкрябування	Зубчасті передачі, підшипники ковзання, рейки і бандажі рухомого складу	Утворення на контактних поверхнях дрібних ямкових вищерблень, різке погіршення якості поверхні, що порушує нормальну роботу деталей	Знижена контактна міцність матеріалу, високі контактні напруження
Абразивне зношування	Плужні лемеші, лапи культиваторів, деталі гусениць тракторів, деталі формувальних машин, пісcomedети, відкриті зубчасті передачі, деталі машин, що піддаються стиранню мінеральними частинками	Поступова зміна геометричних розмірів. На поверхнях тертя спостерігаються характерні подряпини	Специфічна взаємодія тертьових поверхонь з абразивними частинками
Задирки	Шестерні зубчастих передач, підшипники ковзання	Адгезія і виривання частинок металу з контактуючих поверхонь	Знижена в'язкість масла і видавлювання масляної плівки при високих швидкостях і великих тисках
Рідинна ерозія	Запірні і регулюючі елементи апаратури трубопроводів, робочі органи живильних насосів, суднові гребні гвинти, робочі камери гідротурбін	Характер зношування поверхні визначається умовами впливу потоку рідини. Руйнування має вигляд плям, смуг, рубців, зубчастих раковин, пустот, вимойн, кратерів	Низька корозійна стійкість металу, високі швидкості потоку, низька межа текучості

Закінчення табл. 3.1

1	2	3	4
Кавітація	Гребні гвинти, деталі гідротурбін, деталі машин, що піддаються водяному охолодженню, трубопроводи	Поява на поверхні металу дрібних, але глибоких ямок (пітингів), які місцями зливаються і утворюють наскрізний отвір	Специфічний вплив рідини при високих швидкостях руху деталі
Атмосферна корозія	Кабіни і кузови, деталі машин, що піддаються дії атмосферних опадів і вологого повітря	Утворення пухких плівок оксидів заліза з подальшим лущенням і появою вогнищ точкової корозії	Незадовільне нанесення захисних покриттів, поганий догляд за машиною
Газова корозія	Деталі котлів, газових турбін, клапани двигунів внутрішнього згоряння, електричні нагрівальні елементи	Утворення на поверхні деталі щільного крихкого шару оксидів металів	Висока температура нагріву і низька окислювальність матеріалу
Корозійна втома	Осьові штоки насосів, гребні вали, керма, металеві канати, ресори та інші деталі, що зазнають знакоперемінних навантажень у корозійних середовищах	Поверхня корозійно-втомного зламу покрита шаром продуктів корозії	Висока температура нагріву і низька окислювальність матеріалу. Спільна дія змінних напружень і корозійно-активного середовища
Корозійне розтріскування	Напружені деталі котлів, судини з нержавіючої сталі, деталі з латуні, дюралюмінію, магнієвих сплавів	Утворення сітки тріщин уздовж меж зерен з різким зниженням міцності матеріалу	Вибіркове корозійне руйнування меж зерен або одного з компонентів сплаву під впливом корозійного середовища і механічних напружень
Корозія або тертя (фреттинг-корозія)	Болтові та заклепувальні з'єднання, посадочні поверхні підшипників кочення, шестерень, муфт, деталі, що перебувають у рухомих контактах	Виникнення на контактних поверхнях, особливо на межі контакту, корозійних пошкоджень у вигляді окремих плям або смуг невеликої глибини	Безперервне руйнування захисної оксидної плівки в точках рухомого контакту

Таким чином, адсорбційний механізм впливу середовища є первинним (таким, що передує всім іншим видам впливу зовнішнього середовища на властивості матеріалів) і найуніверсальнішим. Адсорбційний вплив докiлля зумовлений, головним чином, двома чинниками:

а) впливом фізико-механічного стану поверхні твердих тіл (металів і неметалів) на їхні механічні властивості. Характеристики пластичної деформації, опір повзучості, втомна міцність і внутрішнє тертя значно змінюються залежно від стану поверхні. Міцність твердих тіл пропорційна їхній поверхневій енергії і, отже, чинники, що спричиняють зменшення вільної поверхневої енергії, тобто зменшення роботи утворення нових поверхонь, спричиняють тим самим більш-менш значне зниження міцності;

б) дією так званих поверхнево-активних (адсорбційно-активних) речовин (ПАР), які знижують поверхневу енергію твердого тіла. Зниження вільної поверхневої енергії, пов'язане з адсорбцією, лежить в основі змін механічних властивостей (міцності та пластичності) твердих тіл під впливом поверхнево-активних речовин (ефект Ребіндера¹). Оскільки руйнування можна розглядати як процес утворення нових поверхонь (поверхонь тріщин і розломів), то, отже, адсорбція поверхнево-активних речовин, зменшуючи роботу, необхідну для утворення нових поверхонь, змінює опір руйнуванню.

Розрізняють зовнішній і внутрішній адсорбційні ефекти. Зовнішній викликається адсорбцією поверхнево-активних речовин на зовнішній поверхні твердого тіла, що призводить до зниження межі плинності та коефіцієнта зміцнення. Внутрішній адсорбційний ефект виникає внаслідок адсорбції поверхнево-активних речовин на поверхні дефектів усередині твердого тіла, наслідком чого є зниження міцності та крихкості.

Прийнято розрізняти прояв адсорбційного зниження міцності під впливом органічних поверхнево-активних речовин, рідких металів і електролітів.

Органічні ПАР – спирти, вищі жирні кислоти, каніфолі, мила тощо, – мають значну за величиною дифільну молекулу², яка не може дифундувати (тобто просочуватися, зміщуватися шляхом дифузії) в решітку

¹ Ефект Ребіндера – зниження міцності твердих матеріалів у присутності поверхнево-активних речовин, що адсорбуються на поверхні та в мікротріщинах і зменшують поверхневу енергію. У результаті полегшується зародження й розвиток тріщин, що може прискорювати руйнування деталей у мастильних або корозійно-активних середовищах.

² Дифільна молекула – молекула з двома частинами різної природи: полярною (гідрофільною) та неполярною (гідрофобною), що зумовлює її адсорбцію на поверхні, але унеможливорює дифузію в кристалічну ґратку металу.

металу. Дія органічних ПАР суто поверхнева, причому ці речовини незначною мірою знижують рівень поверхневої енергії металу (не більш як 10–15 % від початкового); їх називають слабкими поверхнево-активними речовинами. Розплавлені легкоплавкі метали, атоми яких за величиною сумірні з константою решітки твердого металу, можуть дифундувати в нього та здатні значно знизити рівень поверхневої енергії твердого металу; ці поверхнево-активні речовини мають назву сильних.

Іони електролітів, схильні до специфічної адсорбції на поверхні твердого металу, заряджають цю поверхню, але через значний розмір зазвичай не можуть впровадитися в ґратки, причому іони галогенів сильно знижують рівень поверхневої енергії металу, тоді як інші іони, наприклад, сульфатні, слабо впливають на рівень поверхневої енергії (аналогічно до слабких ПАР). Приборкання, що робить ПАР більш міцним, пов'язане з наявністю мікротріщин на поверхні, які виникають у процесі деформації чи наявних ще до докладання навантаження. ПАР фізично адсорбуються на поверхні тіла, впроваджуючись у всі дефекти, мігруючи до основи тріщини. У результаті створюється великий тиск, величина якого визначається рівнянням, виведеним для тиску, що розвивається в капілярах

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r}, \quad (3.8)$$

де ΔP – тиск поперек меніска;

r – радіус пори;

θ – кут контакту, що характеризує ступінь змочування;

γ – вільна поверхнева енергія.

Коли матеріал змочується повністю ($\cos \theta = 1$), $\Delta P_{\max} = 2\gamma/r$. За малої величини r тиск може бути дуже великим.

Процеси теплового руйнування твердих тіл. Теплова стійкість до руйнування твердих тіл, так само, як і теоретична механічна міцність, визначається енергією міжмолекулярного, міжатомного зв'язку (енергією кристалічної решітки). Велика величина енергії зв'язку характеризує здатність до утворення решіток з високою нагрівостійкістю, механічною та електричною міцністю. Залежно від швидкості нагрівання теплове руйнування являє собою плавлення або випаровування (сублімацію) твердого тіла.

Процес плавлення твердого тіла характеризується температурою і теплотою плавлення (кількістю енергії, необхідною для плавлення одного моля речовини за постійної температури), величини яких зростають зі збільшенням енергії зв'язку. Спостережувана кореляція між плавленням і механічним руйнуванням відповідає зв'язку між пластичною деформацією та руйнуванням: елементарні акти при плавленні та пластичній деформації вважаються однаковими (при пластичній деформації настає локальне плавлення внаслідок підвищення температури у вузькій зоні вздовж площини ковзання за рахунок енергії зовнішнього джерела).

Природа фізичних процесів механічного і теплового руйнування матеріалу близькі. На взаємний зв'язок цих процесів вказує, зокрема, те, що одночасна дія механічного навантаження і нагрівання чинить однакову сукупну дію, що прискорює руйнування металу.

Процеси сублімації (випаровування, вигонки) твердих тіл, що відбуваються при будь-якій температурі, необхідно враховувати під час експлуатації виробів. Випаровування твердого тіла відбувається в результаті збільшення енергії теплового руху до величини, необхідної для подолання сил зв'язку між частками твердого тіла та для відриву частинок з поверхні кристала (теплота сублімації або теплота випаровування). При випаровуванні твердого тіла кристалічна решітка повністю руйнується; швидкість теплового руйнування твердого тіла залежить від енергії, що підводиться, тиску, структури тіла та інших порушень.

При термічному руйнуванні (випаровуванні) у вакуумі чистих металів, сплавів, оксидів металів, діелектриків, напівпровідників так само, як і при їхньому механічному руйнуванні, спостерігаються однакові закономірності; температурно-часова залежність механічної та теплової міцності твердого тіла виражається аналогічними експоненціальними залежностями; час випаровування зменшується експоненційно з підвищенням температури тіла і зменшенням теплоти випаровування.

3.3. Процеси електричного руйнування твердих діелектриків і напівпровідників

Процеси електричного руйнування діелектричних матеріалів можуть бути двох видів: пробій товщі діелектрика та розряд по поверхні діелектрика. Пробій діелектрика відбувається під час накладення елек-

тричного поля, напруженість якого перевищує певне критичне значення – пробивну напруженість $U_{пр}$, що характеризує електричну міцність діелектрика. Для твердих діелектриків характерні дві основні форми пробою: пробій, викликаний електричним розрядом (суто електричний пробій), і тепловий пробій.

Деякі особливості суто електричного і теплового пробою багатьох твердих діелектриків спричинені наявністю двох температурних ділянок, у яких діелектрик поводить по-різному. У ділянці нижчих температур, що відповідає суто електричному пробою, пробивна напруженість не залежить від температури (так само, як і від часу впливу напруги, якщо вона не мала). В області, що відповідає тепловому пробою, пробивна напруженість залежить як від температури, так і від тривалості впливу напруги: що менший час впливу, то вища пробивна напруженість.

Напруженість при електричному пробої різних твердих діелектриків становить 10^6 – 10^7 В/см; тепловий пробій у звичайних умовах відбувається здебільшого за напруженості поля 10^4 – 10^5 В/см. Іноді виділяють як окремі форми пробою хімічний (електрохімічний) пробій і пробій, спричинений фізичними дефектами діелектрика. Під хімічною формою пробою розуміють пробій, пов'язаний зі зниженням електричної міцності діелектрика внаслідок хімічних змін, які відбуваються в діелектрику під час тривалої дії високої напруги. При цьому, по суті, відбуваються два послідовних процеси: процес фізико-хімічної зміни діелектрика (старіння), що знижує його електричну міцність, і власне пробій, який може бути тепловим або чисто електричним.

Зазвичай руйнування ізоляції під час експлуатації відбувається внаслідок комбінованої дії низки чинників: термічного впливу за підвищених температур, впливу електричної напруги, механічного впливу, впливу вологи, забруднень і т.ін.

Напівпровідники, так само як і діелектрики, володіють певною електричною міцністю, яку характеризує критична напруженість електричного поля (пробивна напруженість), за якої починається різке зростання електропровідності. Відмінності пояснюються, головним чином, різною шириною смуги заборонених енергій між валентною зоною і зоною провідності: у діелектриках вона більша за 3 еВ (електрон-вольт), у напівпровідниках – менша за 2 еВ. Втрата електричної міцності та пробій напівпровідників під дією електричного поля залежно від низки умов може бути викликана різними фізичними процесами. У зв'язку з цим розрізняють так само, як для твердих діелектриків, електричний, тепловий і комбінований пробої напівпровідників.

Електричний пробій твердих діелектриків являє собою складний комплекс різноманітних фізичних процесів і явищ: електричних, механічних, теплових. Характерною особливістю електричного пробію, який виникає в чистому вигляді в однорідному полі, за відсутності крайових розрядів, за короткочасного прикладання напруги, є зростання струму перед пробієм зі збільшенням напруги приблизно за експоненціальним законом розподілу і майже стрибкоподібне збільшення струму за досягнення певної напруженості поля (під час пробію). Великий струм, що утворюється, здатний розплавити, обвуглити або спалити діелектрик, за невеликого струму в місці пробію залишається слід у вигляді проколу або прориву.

Найімовірнішим видом електричного пробію твердих діелектриків є ударна іонізація електрострумами або іонами. Під час руху в решітці твердого тіла електрони провідності віддають енергію, отриману від електричного поля, атомам або іонам кристала, викликаючи іонізацію. Руйнування діелектрика в стадії завершення розряду і післяпробійної стадії значно більше, ніж у стадії формування розряду. У стадії завершення розряду (стадії руйнування) виділяється енергія, принаймні, на три порядки більша, ніж у стадії формування розряду.

Розрізняють два основні види *електричного розряду по поверхні діелектрика* та відповідного їм електричного пошкодження:

- поверхневе або дугове перекриття, коли електрична дуга починається та проходить у газі, який перебуває над поверхнею ізоляційного матеріалу;

- поверхневе пошкодження, яке прогресує і відбувається через руйнівний вплив поверхневих дугових розрядів або іскріння.

За прогресуючого пошкодження від кожного розряду на поверхні діелектрика з'являється незникаючий дефект (провідний слід або провідна доріжка), що має зазвичай деревоподібну форму і здатний спричиняти сильну ерозію поверхні. Вплив дуги і провідного сліду є, в основному, термічним, тобто вони викликають високотемпературні реакції, такі, як розкладання або горіння. Поверхневе, дугове покриття ізоляційних конструкцій залежить від великої кількості чинників, до яких відносяться площа і стан поверхні діелектрика, розташування поверхні діелектрика відносно електродів, відносні значення діелектричної проникності двох середовищ (твердого діелектрика і газового середовища), електрична міцність газу, контакт між електродом і ізоляційним матеріалом, форма прикладеної напруги, тривалість її дії, товщина ізоляції та ізоляційні відстані та ін. Тепловий пробій твердих діелектриків походить від тривалого впливу електричної напруги і є нас-

лідком порушення теплової рівноваги діелектрика (коли підведення тепла до діелектрика перевищує відведення тепла теплопровідністю, випромінюванням і конвекцією). Порушення теплової рівноваги призводить до катастрофічного накопичення кількості тепла, що виділяється в діелектрику, і до його термічного руйнування (пропалювання, плавлення або розкладання). Тепловий пробій відбувається, коли прикладена напруга є недостатньою для того, щоб викликати електричний пробій за даної температури, і коли внаслідок виділення тепла відбувається таке підвищення температури в діелектрику, що знижуються його електричний опір та електрична міцність до величини, що відповідає прикладеній напрузі.

Виникнення електричного пробою напівпровідників у сильному електричному полі зумовлене різким збільшенням концентрації носіїв зарядів унаслідок генерації електронно-діркових пар електричним полем. У напівпровідникових приладах у разі підвищення зворотної напруги (прикладеної до електронно-діркового *p-n* переходу) до певної величини різко зростає зворотний струм, унаслідок чого може статися пробій *p-n* переходу. Електричні пробої в об'ємі напівпровідників можуть спричинятися електростатичною іонізацією (електростатичний, тунельний, зінерівський пробій) або ударною іонізацією (ударний або лавинний пробій).

Пробій може настати внаслідок спільної дії ударної та електростатичної іонізації. Поряд із пробоем в об'ємі напівпровідника буває поверхневий пробій.

У низці випадків напівпровідникові прилади можуть вийти з ладу через їхній тепловий пробій, що знижує їхню теплову стійкість. Дослідженнями встановлено, що практично у всіх випадках теплового пробою транзисторів:

а) вихід їх з ладу супроводжується виникненням незворотного короткого замикання між колектором і емітером або, що буває значно рідше, між колектором і базою;

б) вихід з ладу відбувається за напруг, значно менших за передбачену технічними умовами граничну напругу для транзисторів цього типу;

в) імовірність відмови швидко зростає з підвищенням температури *p-n* переходу й прикладеної до нього напруги;

г) імовірність відмови транзисторів із більшим зворотним струмом колекторного переходу вища.

3.4. Старіння матеріалів

Старіння металів і сплавів. Старінням матеріалів називають процеси зміни їхніх фізико-механічних властивостей у часі в умовах тривалого зберігання та експлуатації. Старіння зумовлене недостатньо стабільним (нерівноважним) станом матеріалу і переходом його в стабільний (рівноважний) стан. Цей перехід може бути пов'язаний зі структурними перетвореннями або бути релаксаційним процесом.

Під час старіння може відбуватися як погіршення, так і поліпшення певних властивостей матеріалів або поліпшення одних властивостей за одночасного погіршення інших. Іноді застосовують штучне старіння матеріалів для поліпшення або стабілізації деяких їхніх якостей.

Металеві сплави можуть являти собою хімічні сполуки, тверді розчини впровадження або заміщення та проміжну фазу між хімічними сполуками і твердими розчинами.

До основних видів перетворень у твердому стані належать алотропічне перетворення; мартенситне перетворення і розпад мартенситної структури; розчинення у твердому стані і розпад пересичених твердих розчинів; впорядкування і розупорядкування твердих розчинів; утворення твердого розчину з евтектоїдної суміші¹ та евтектоїдний розпад.

Перелічені види перетворень можна поділити на дві групи: ті, що протікають без зміни хімічного складу фаз, що утворюються під час перетворень (пов'язані лише зі змінами кристалічної структури), та ті, що супроводжуються утворенням фаз зі зміненням хімічним складом.

Деякі із зазначених перетворень можуть відбуватися в широкому діапазоні температур. Інші види перетворень відбуваються за певних, дуже високих або низьких, температур, що досягаються не тільки під час спеціального термічного оброблення, а й під час експлуатації багатьох сучасних технічних пристроїв: реактивних двигунів, двигунів внутрішнього згоряння, газових турбін, космічних апаратів тощо.

Старіння, зумовлене розпадом пересичених твердих розчинів, використовується в багатьох термічно оброблюваних сплавах на залізній, алюмінієвій, мідній, магнієвій, нікелевій і кобальтовій основі. Здат-

¹ Евтектоїдна суміш – дрібнодисперсна механічна суміш двох твердих фаз, що утворюється в твердому стані з одного твердого розчину за певної температури та складу. Приклад: у вуглецевій сталі аустеніт при температурі $\approx 727^\circ\text{C}$ евтектоїдно розпадається на ферит і цементит, утворюючи структуру перліту, яка і є типовою евтектоїдною сумішшю.

ність до старіння визначається зростаючою зі зростанням температури розчинністю будь-якого компонента сплаву в основному металі, тобто зміною граничного насичення твердого розчину зі зміною температури. У процесі старіння сплав, однофазний при високій температурі, при більш низькій температурі розпадається на дві (або більше) фази відповідно до діаграми станів; при цьому друга фаза (виділення) може бути металевим з'єднанням або новим твердим розчином з іншим вмістом розчиненого компонента.

Для швидкості розпаду в більшості випадків справедливі такі якісні закономірності: швидкість розпаду (виділення) тим більша, чим вища температура старіння сплаву; за цієї температури в сплавах із низькою температурою плавлення виділення йде швидше, ніж у тугоплавких сплавах; порушення кристалічної решітки вихідного твердого розчину (матриці) внаслідок опромінення і холодної деформації прискорюють процес виділення; присутність розчинних або нерозчинних включень прискорює процес виділення.

Старіння, зумовлене розпадом пересичених твердих розчинів, спричиняє зміну механічних і фізичних властивостей сплаву: міцності, твердості, електроопору, коерцитивної сили, стійкості проти корозії тощо. Процеси, що протікають на перших стадіях старіння, призводять до зміцнення сплаву, збільшення його твердості, підвищення опору пластичній деформації, пов'язаного з тим, що зміни структури сплавів на цих стадіях старіння ускладнюють переміщення дислокацій під час пластичної деформації.

Однак четверта стадія – коагуляція дисперсних частинок – завжди пов'язана зі зниженням міцності; поряд із коагуляцією частинок знеміцнення зумовлене втратою когерентності ґраток нової фази і твердого розчину, збіднінням твердого розчину розчиненим компонентом у процесі виділення. Унаслідок цього зміна міцності, електроопору та коерцитивної сили пересиченого твердого розчину в процесі його старіння характеризується кривою з максимумом. За великих інтервалів часу міцність знижується до значень, притаманних сплаву до старіння і менших. Знижена внаслідок старіння пластичність веде до розвитку міжзеренного руйнування, що пов'язано з присутністю локалізованих виділень на межах зерен.

Під час розпаду пересичених розчинів знижується опірність сплаву корозії. У старіючих сплавах відбувається корозійне розтріскування під напругою, пов'язане з локалізованим виділенням на кордонах зерен. Присутність навіть малих компонентів локалізованих виділень

може призвести до виникнення розтріскування на кордонах зерен у ділянці деталі, що зазнала великого напруження.

*Мартенситне перетворення*¹ відбувається у сплавах з мартенситною структурою – специфічною голчастою мікроструктурою металевих сплавів (сталей, сплавів Cu-Al, Cu-Sn та ін.), деяких металів і навіть неметалевих матеріалів. До мартенситних перетворень відносять також *алотропні перетворення* в безвуглецевих сплавах заліза з хромом, нікелем, марганцем, а також алотропні перетворення в кобальті, титані, цирконії та в сплавах на основі титану і цирконію.

Старіння полімерних матеріалів. Фізико-механічні властивості полімерів (межа міцності під час розтягування, опір пластичній деформації, температура розм'якшення, еластичність тощо) визначають їхнім хімічним складом і структурою: областями кристалічної й аморфної будови, формою та ступенем рухливості ланцюгів, величиною й характером сил, що діють між ланцюгами. Старінням полімерів (і пластичних мас на їхній основі) називається залежна від часу зміна їхніх властивостей в умовах зберігання або експлуатації. Старіння технічних полімерних матеріалів зумовлене процесами, що призводять до розпаду основних ланцюгів макромолекул на уламки більш простої будови, або до зміни будови макромолекул і взаємодії між ними. Процеси деструкції можуть відбуватися під впливом фізичних (тепло, світло) або хімічних (кисень, вода) чинників.

Під час старіння пластичних матеріалів можуть змінюватися структура, молекулярна вага, хімічний склад, взаємодія макромолекул, що визначають фізико-механічні властивості цих матеріалів. Зменшення довжини ланцюга і молекулярної ваги полімерів, яке відбувається під час старіння внаслідок деструкції, істотно погіршує їхні механічні властивості: знижує міцність під час розтягування, збільшує крихкість за низьких температур, знижує стійкість до стирання. У результаті процесів структурування підвищується нерозчинність полімерів, їхня твердість і міцність; при цьому збільшується також крихкість і знижується пластичність та еластичність. За тривалої витримки полімеру в умовах постійної високої температури його міцність може спочатку зменшитися внаслідок деструкції ланцюга, а потім знову збільшитися через структурування. Зрештою, міцність знижується в результаті повного розкладання полімеру.

¹ Мартенситне перетворення – бездифузійне фазове перетворення в металах і сплавах (переважно сталях), що відбувається під час швидкого охолодження та полягає в зсувній перебудові кристалічної ґратки без переміщення атомів на великі відстані; супроводжується різким зростанням твердості й крихкості матеріалу.

Старіння напівпровідників і напівпровідникових приладів. Виникнення відмов і погіршення працездатності напівпровідникових приладів під час експлуатації пов'язане в багатьох випадках з їхнім старінням. Це проявляється в деградації, дрейфі основних параметрів і характеристик приладів: збільшенні зворотного струму діодів і некерованих зворотних струмів колекторного й емітерного переходів транзисторів, дрейфі коефіцієнтів передавання струму транзисторів, зниженні пробивних напруг p - n переходів, зменшенні пікового струму тунельних діодів тощо. Процеси старіння призводять до відхилення вольт-амперної характеристики p - n переходу приладу від нормальної.

Процеси, які зумовлюють зміни параметрів та характеристик приладів, значно відрізняються від зовнішніх впливів, які спостерігаються у інших приладах. Характер впливу деяких зовнішніх впливів зазначено в табл. 3.2.

Погіршення з часом параметрів і характеристик напівпровідникових приладів зумовлене фізико-хімічними процесами в напівпровідниках, що визначається, головним чином, двома їхніми особливостями:

1) високою чутливістю поверхні напівпровідників з p - n переходами як до фізичних умов, так і до хімічної природи довкілля;

2) високою чутливістю властивостей напівпровідників до домішок, неоднорідностей та дефектів структури напівпровідників.

Таблиця 3.2

Вплив деяких зовнішніх впливів на напівпровідникові прилади

Вид зовнішнього впливу	Основні викликані або прискорені процеси	Типові дефекти
1	2	3
Підвищена температура	Висихання захисних покриттів та їхня деформація. Виділення газів. Розплавлення. Розтріскування кристалів. Міграція захоплених домішок, вологи та газів. Іонізація домішок. Зміна електричних характеристик. Збільшення розмірів	Зниження гранично допустимих напруг (пробій переходів). Погіршення електричних характеристик. Втрата герметичності. Обриви та короткі замикання
Знижена температура	Конденсація вологи. Розтріскування кристалів. Зміна електричних характеристик. Скорочення розмірів	Пробій переходів. Погіршення електричних характеристик. Втрата герметичності. Обриви та короткі замикання

Закінчення табл.3.2

1	2	3
Підвищена відносна вологість	Адсорбція й абсорбція вологи. Хімічні реакції з вологою. Електроліз. Корозія	Погіршення електричних характеристик. Поява нестабільності. Корозія виводів і корпусу. Пошкодження лакофарбових покриттів
Різкі неодноразові зміни температури	Механічні напруження в місцях спаю. Розтріскування кристалів. Розтріскування та деформація покриттів. Зміна розмірів	Втрата герметичності. Обриви та короткі замикання. Погіршення електричних характеристик
Знижений тиск	Погіршення теплопередачі. Зменшення пробивної напруги	Перегрів. Зовнішній пробій між виводами або між виводами і корпусом
Механічні впливи (вібрація, удари, прискорення)	Механічні напруження, в тому	Обриви та короткі замикання. Втрата герметичності

Навколишня температура і потужність, що розсіюється, найбільшою мірою прискорюють процеси зміни параметрів, що спричиняють відмови. Сильна залежність параметрів від температури є принциповою особливістю напівпровідникових приладів, пов'язаною з фізичними властивостями напівпровідників.

Запитання до самоконтролю

1. Що визначає внутрішній механізм і швидкість виникнення відмови?
2. Чому важливе поєднання статистичних та імовірнісних методів у дослідженні надійності?
3. Які основні показники надійності залежать від фізичних властивостей матеріалів?
4. Як процеси в об'ємі матеріалу впливають на працездатність елементів?
5. Яке значення мають процеси на поверхні твердих тіл у формуванні відмов?
6. Як змінюється фактичний стан матеріалу під впливом енергії?
7. Які види енергії відіграють найважливішу роль у виникненні відмов?
8. Які особливості має механічна взаємодія в контексті надійності?

9. Чим теплова взаємодія відрізняється від механічної?
10. Як перетворення одного виду енергії в інший впливає на працездатність матеріалів?
11. Яке значення мають закони термодинаміки для аналізу надійності?
12. Чому теплова енергія є особливо важливою серед інших видів енергії?
13. Як експлуатаційні впливи впливають на надійність технічних пристроїв?
14. Чому важливо враховувати взаємний вплив різних процесів під час аналізу причин відмов?
15. Що таке енергія активації та як вона впливає на фізико-хімічні процеси?
16. Чому тільки частина молекул бере участь у хімічних перетвореннях?
17. Як переміщення елементарних частинок впливає на властивості матеріалів?
18. Що визначає швидкість хімічних та фізичних процесів у матеріалах?
19. Яке значення мають квантові розподіли Бозе-Ейнштейна і Фермі-Дірака в механізмах відмов?
20. Чим класична теорія механічного руйнування відрізняється від кінетичної?
21. Як кінетична теорія пояснює поступове руйнування матеріалів?
22. Які параметри визначають довговічність матеріалів за механічного навантаження?
23. Як змінюється швидкість механічного руйнування з підвищенням температури?
24. Чому процес руйнування є термоактиваційним?
25. Як дифузія вакансій впливає на виникнення тріщин у металах?
26. Чим механізм руйнування полімерних матеріалів відрізняється від металів?
27. Як тріщини розвиваються в механічно навантаженому матеріалі?
28. Як впливає характер навантаження на механізм руйнування?
29. Чому швидкість навантаження впливає на крихкість або пластичність матеріалів?
30. Які основні види електричного руйнування діелектриків?
31. Що таке пробій і які його види існують у твердих діелектриках?
32. Яка різниця між електричним і тепловим пробоем?

33. Як залежить пробивна напруженість від температури?
34. Чому електричний пробій може мати імовірнісний характер?
35. Які чинники впливають на електричну міцність діелектриків?
36. Як виникає дуговий пробій на поверхні діелектрика?
37. Як напівпровідники реагують на електричне перевантаження?
38. Чим лавинний пробій відрізняється від тунельного пробою?
39. Як впливає електростатична іонізація на напівпровідники?
40. Чому електричний пробій може супроводжуватися механічними пошкодженнями?
41. Як зменшення пробивної напруженості впливає на експлуатацію електронних пристроїв?
42. Чому тепловий пробій є критичним для напівпровідникових приладів?
43. Як електричні пробої впливають на довговічність ізоляційних матеріалів?
44. Які заходи можна вжити для запобігання електричному руйнуванню?
45. Що таке старіння матеріалів і які фактори його викликають?
46. Як старіння впливає на фізико-механічні властивості матеріалів?
47. Які процеси відбуваються під час старіння металів?
48. Чому нестабільний стан матеріалу переходить у рівноважний під час старіння?
49. Як структурні перетворення можуть змінювати властивості матеріалів?
50. Які основні види старіння характерні для металевих сплавів?
51. Як впливає старіння на міцність і пластичність матеріалу?
52. Чому старіння може використовуватися для зміцнення сплавів?
53. Як дифузійні процеси впливають на старіння матеріалів?
54. Яке значення має температура в процесах старіння?
55. Як впливає наявність домішок у металах на процес старіння?
56. Які механізми руйнування прискорюються старінням?
57. Як впливає старіння на електропровідність матеріалів?
58. Чому старіння може бути небезпечним для тривалих конструкцій?
59. Які методи використовуються для запобігання старінню матеріалів?

Загальна характеристика показників надійності рухомого складу

У разі апріорного аналізу надійності на ранніх етапах проектування користуються імовірнісними визначеннями показників надійності. На наступних етапах проектування, розроблення та виробництва під час апостеріорного аналізу надійності, пов'язаного зі статистичним опрацюванням експериментальних даних, користуються, як правило, статистичними визначеннями показників надійності. У зв'язку з цим нижче наводяться імовірнісні та статистичні визначення найпоширеніших показників надійності. *Статистичні показники* зі зростанням кількості випробовуваних об'єктів наближаються до аналогічних *імовірнісних показників*.

4.1. Принципи вибору показників надійності

Кількісні показники, що дають змогу дати сувору оцінку різним аспектам якості численних технічних об'єктів, систем, пристроїв, машин, а також їхнього функціонування в процесі використання, потрібні під час розроблення дедалі складніших технічних систем, контролю якості їхнього виготовлення, прогнозування їхнього ресурсу працездатності, аналізу фактичного рівня надійності в процесі експлуатації за конкретних умов.

Очевидно, першою ознакою видокремлення теорії надійності як самостійної прикладної науки є розроблення методів кількісної оцінки якості виробів та системи відповідних кількісних показників. Для кожного типу (класу) технічних об'єктів певного функціонального призначення, ступеня їхньої складності, режиму експлуатації, характеру та розміру наслідків відмов вибираються свої кількісні показники надійності. Правильність вибору показників надійності суттєво впливає

на схемно-конструктивне рішення при створенні виробу, а також на прогнозування показників надійності, встановлення кількісних норм надійності, розроблення методів перевірки вимог до надійності під час випробувань і, звісно, на організацію процесів експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

Основою при виборі показників надійності є інтегральна характеристика якості виробу – середнє значення ефекту, одержуваного від використання виробу за час його експлуатації. Показники надійності розглядають не абстрактно, а у зв'язку з тим, як вони впливають на цю характеристику. Це повною мірою стосується локомотивів зі своїми особливостями процесу експлуатації. Необхідність виконання графіка руху поїздів, забезпечення безпеки руху, безпеки пасажирів і обслуговуючого персоналу накладає додаткові вимоги до вибору показників надійності рухомого складу. Для того, щоб кількісно описати цей вплив, необхідно використовувати математичні моделі експлуатації технічних систем.

Природно, моделі є різними залежно від призначення, особливостей конструктивного виконання та використання конкретних видів машин.

Науці про надійність потрібні методи кількісних вимірювань. Однак методів кількісних вимірювань не меншою мірою потребує і практика (як виробництво технічних засобів, так і їхня експлуатація), тому що передусім у практичній роботі виявляється необхідність в оцінці заходів, спрямованих на підвищення надійності виробів, у порівнянні рівня надійності різних варіантів конструкцій того самого виробу, в оцінці надійності виробу для визначення здатності цього виробу виконувати задані функції. Тому кількісні показники мають бути застосовні як для наукового аналізу, так і для практичного застосування при створенні техніки та її використанні.

Визначення на практиці кількісних показників надійності дає змогу розв'язати в процесі експлуатації такі завдання: по-перше, здійснювати розрахунок надійності об'єкта, який перебуває в експлуатації; по-друге, сформулювати вимоги, які висувають до новостворюваних об'єктів; по-третє, заздалегідь розрахувати терміни служби об'єкта і необхідну кількість запасних частин, планове завдання на ремонт тощо.

Відповідно до визначення, надійність – це властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах упродовж необхідного проміжку часу або необхідного наробітку. Звідси випливає, що надійність є комплексною, багатосторонньою властивістю, яка зумовлюється безвідмовністю, ремонтпри-

датністю, довговічністю та збережуваністю виробу, що відображають показники надійності.

Тривалість безвідмовного стану, перебування в ремонті, роботи до граничного стану є випадковими величинами. Цей факт, що пояснюється фізичною природою явищ, які призводять до переходу виробу з одного стану в інші, зумовлює застосування теоретико-імовірнісних методів для оцінювання показників надійності.

І, нарешті, практика задає основні вимоги до того, що мають являти собою показники надійності, як вони мають співвідноситися із загальними показниками функціональної ефективності використання виробів. Таким чином, підходити до вибору показників надійності різних технічних систем, зокрема, рухомого складу, необхідно з урахуванням перерахованих вище принципів.

4.2. Фактори, що впливають на вибір показників надійності рухомого складу

Для кількісного аналізу процесу функціонування, необхідного для оцінювання ефективності використання та вибору показників надійності технічного пристрою, слід побудувати модель його функціонування. Під процесом функціонування технічних пристроїв розуміють послідовну зміну їхніх станів у часі використання за призначенням, заради якого вони створені. Період використання складних систем за призначенням, як правило, не є безперервним або внаслідок відсутності такої необхідності, або внаслідок особливостей самих систем (необхідність зупинки для виконання технічного обслуговування або ремонту). В окремі періоди використання за призначенням технічні пристрої можуть відрізнятися як режимом роботи, так і умовами експлуатації.

Очевидно, що здатність функціонування може визначатися низкою технічних характеристик – вихідних параметрів. Наприклад, для тепловоза такими параметрами є потужність по дизелю, дотична потужність тепловоза загалом, тягове зусилля, питома витрата палива тощо. Відомо, що використання будь-якого технічного пристрою за призначенням призводить до поступової зміни (погіршення) ним низки функціональних властивостей унаслідок зносу та незворотних змін фізико-хімічних властивостей матеріалу деталей тощо, а отже, до зміни вихідних параметрів. Тому мають бути задані певні межі допустимих

змін цих параметрів під час впливу внутрішніх робочих навантажень і зовнішніх факторів умов експлуатації.

Вихід робочих параметрів за межі допуску означає відмову. Іноді відмова пристрою за одним параметром або відмова будь-якої складової його частини зберігає можливість пристрою функціонувати, але зі зниженими параметрами ефективності. Характеристика станів виробу в період експлуатації буде повною в тому разі, якщо враховують увесь комплекс чинників, що впливають на процес функціонування та на надійність. Для всієї безлічі різноманітних технічних пристроїв фактори, які впливають на їхню надійність, можна розділити на такі класи.

1. Фактори, що характеризують особливості конструкції. За цією ознакою розрізняють ремонтвані (відновлювані) та неремонтвані (невідновлювані) технічні пристрої. Одиниця рухомого складу (локомотив, вагон) як складна технічна система належить до класу ремонтваних (відновлюваних), але до його складу входить значна кількість деталей, що відносяться до класу неремонтваних (наприклад, це щітки електричних машин, поршневі кільця, пружини, ресори і т.п.).

2. Фактори характеру і режиму використання виробів за призначенням відображають тривалість експлуатації, часовий розподіл навантаження та його напруженості в процесі експлуатації. При цьому під експлуатацією ремонтваного технічного об'єкта, розуміють сукупність усіх фаз його існування, зокрема періоди зберігання, підготовки до використання, технічного обслуговування та ремонту. Експлуатація триває або до відмови, або до виконання необхідних функцій, або до досягнення граничного стану. Граничний стан виробу визначається неможливістю його подальшої експлуатації, обумовленою або зниженням ефективності, або можливістю порушення вимог безпеки.

Фактори тимчасового режиму використання технічних пристроїв за призначенням поділяють на три групи: безперервний режим, переривчастий регулярний, переривчастий випадковий. Рухомий склад за цією ознакою належать до числа технічних пристроїв, що працюють у переривчастому регулярному режимі.

3. Фактори наслідків відмови рухомого складу загалом характеризуються розміром збитку, що спричиняється затримкою руху поїзда, необхідністю виклику резервного локомотива для виведення поїзда з перегону на станцію, витратами на відновлення працездатності локомотива, що відмовив. У деяких випадках у разі відмови ходової частини можлива катастрофа поїзда, порушення безпеки руху, вплив на здоров'я і життя людей.

4. *Фактори функціональної структури* відображають стан виробу в процесі експлуатації та наявність у ньому різних видів надмірності (структурної, часової, інформативної, енергетичної). У цьому сенсі в локомотивів можуть бути елементи структурної надмірності (наявність двох секцій) та енергетичної надмірності, необхідних для виведення поїзда з перегону в разі відмови однієї секції.

5. *Фактори організації експлуатації* відображають передбачувані види технічного обслуговування та ремонту з необхідною кваліфікацією обслуговуючого та ремонтного персоналу.

6. *Фактори зберігання* для рухомого складу зводяться до знаходження їх у резерві в конкретних умовах і в запасі із забезпеченням умов консервації.

7. *Фактори сфери застосування і зовнішніх умов* характеризують сферу використання виробів – усередині країни або за її межами (тобто вироби, призначені для експорту) та кліматичні фактори. Для рухомого складу, крім кліматичних параметрів, важливе значення мають характеристики тягової ділянки (радіуси кривих, крутизна підйомів, стан колії, допустимі швидкості та їхні обмеження тощо).

Перелічені вище чинники впливають на процеси зміни працездатності рухомого складу, та на показники ефективності його використання, а тому й на вибір кількісних показників надійності рухомого складу загалом та його елементів (систем, агрегатів, вузлів, деталей).

4.3. Рухомий склад як об'єкт вивчення надійності: стани, події, властивості

4.3.1. Технічні стани та події

Терміни та визначення основних понять у сфері надійності технічних об'єктів встановлено державним стандартом ДСТУ 2860-94 «Надійність у техніці. Терміни та визначення». Його застосування обов'язкове в усіх видах технічної документації, у навчальній, технічній, довідковій та іншій літературі. Функціональні та конструктивні особливості рухомого складу (вагонів, електровозів, тепловозів, електро- і дизель-поїздів) зумовлені їхнім призначенням, режимами роботи, умовами експлуатації, також можуть бути враховані у певних галузевих стандартах.

У стандартах усі терміни і визначення дано стосовно технічних об'єктів. Під *об'єктом* розуміють технічну систему (тобто сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів), що має властивість виконувати задану функцію. Така технічна система, що має певне цільове призначення, розглядається як єдине ціле на всіх етапах її створення і терміну служби, тобто в періоди проектування, виробництва, експлуатації, технічного обслуговування, ремонту, досліджень і випробувань на надійність. Вона складається з *елементів*: підсистем, вузлів, агрегатів, деталей. Елементи як окремі складові технічної системи є також технічними об'єктами, але не мають самостійного (поза системою) експлуатаційного призначення і виконують часткові функції, з яких формується функція системи в цілому.

Поняття елемента і системи трансформуються в залежності від поставленої задачі. Наприклад, колекторно-щітковий апарат при встановленні його власної надійності розглядається як система, що складається з окремих елементів – колектора, щіток, щіткотримача і т.п., а при визначенні надійності генератора – як елемент. Тобто у залежності від рівня задачі що розв'язується та ступеня об'єднання апаратів і пристроїв, надійність яких аналізується, певний об'єкт може в одному випадку бути системою, а в іншому – елементом.

Опис і характеристику одиниць рухомого складу як об'єктів дослідження надійності доцільно починати з їх подання у вигляді системи взаємопов'язаних елементів. Як і для будь-яких технічних об'єктів, принципово важливим є вибір рівня розгляду. Так, на рис. 4.1 наведено узагальнену структурну схему локомотива як системи елементів для кількох можливих рівнів декомпозиції¹.

Запропонована схема не є універсальною і може змінюватися залежно від поставлених завдань аналізу. Зокрема, сам локомотив за певних умов може розглядатися як елемент системи вищого рівня – наприклад, «експлуатований парк локомотивів депо». Аналогічно, залежно від мети дослідження, у вигляді самостійної системи можуть бути подані окремі вузли, наприклад, «візок у зборі» тощо.

Разом із тим, схема взаємозв'язків систем і елементів є недостатньою для встановлення кількісних залежностей показників надійності, оскільки вона відображає лише конструктивні та функціональні зв'язки. Для аналізу надійності більш придатними є структурні логічні

¹ Декомпозиція – поділ складного технічного об'єкта на підсистеми, вузли та елементи з утворенням ієрархічної структури для їх окремого аналізу й подальшої оцінки властивостей системи в цілому.

блок-схеми, у яких елементи з'єднуються послідовно або паралельно з урахуванням їх якісного та кількісного впливу на надійність системи. За послідовного з'єднання відмова будь-якого елемента призводить до втрати працездатності всієї системи, до складу якої він входить.

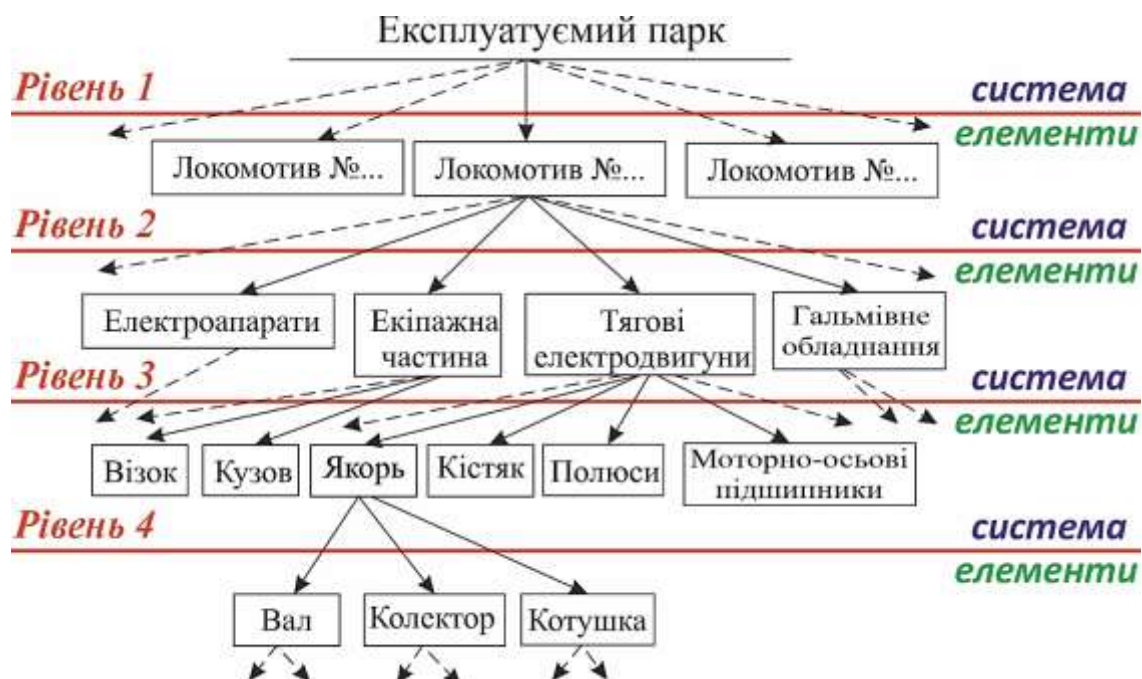


Рис. 4.1. Узагальнена схема взаємозв'язків систем і елементів у задачах аналізу надійності локомотивів

Наприклад, за роботи електровоза постійного струму на підвищених швидкостях обертання вентиляторів генератори керування слід розглядати як елементи, з'єднані паралельно у структурній схемі надійності кола керування, навіть якщо в конкретний момент часу навантаженим є лише один із них, а другий перебуває в резерві. Водночас вентилятори охолодження тягових двигунів, підключені паралельно до мережі живлення, у структурній схемі надійності розглядаються як послідовно з'єднані елементи, оскільки відмова будь-якого з них унеможливіє роботу електровоза на повній потужності.

Чітке уявлення одиниці рухомого складу як співвідношення системи та елементів дає змогу конкретизувати задачу аналізу надійності та розроблення заходів щодо її підвищення. Із цього також випливає, що в загальному випадку в якості об'єктів, надійність яких розглядають на стадіях проектування, виготовлення, експлуатації, ремонту та випробувань, слід розуміти не тільки самі одиниці рухомого складу, а й їхні складальні одиниці та деталі.

Під час розв'язання задач надійності складальних одиниць (елементів) одиниці рухомого складу істотне значення має визначення їх як об'єктів, що не ремонтуються або ремонтуються. Як і взагалі для будь-яких технічних пристроїв, згідно з [2], ремонтпридатним у деякій конкретній ситуації є той об'єкт, працездатність якого за цих умов може бути відновлена. Специфічною в даному випадку є ситуація, в якій оцінюється можливість або неможливість відновлення, зокрема, робота локомотива на шляху прямуювання по перегону. У багатьох випадках складальні одиниці, деталі одиниці рухомого складу, несправності та відмови яких легко усуваються в умовах депо, пунктів технічного обслуговування і навіть на тракційних коліях, виявляються не ремонтпридатними на перегоні через обмеженість часу відновлення та відсутність необхідних засобів та умов.

Такі складальні одиниці, як бандажі колісних пар, поршневі пальці, гільзи циліндрів та інші елементи, які в загальному випадку можна ремонтувати, за умови досягнення певного напрацювання, коли їхні розміри або стан виходять за допустимі межі, стають неремонтованими. Однак більшість складальних одиниць рухомого складу можна віднести однозначно до ремонтваних або неремонтованих по всьому терміну служби до граничного стану. Наприклад, елементи електроніки, напівпровідникові вентиля, підшипники кочення, осі колісних пар, лампи освітлювальні та сигнальні, поршневі кільця (за зломом і зношуванням), фільтрувальні елементи, різні пружини (при втраті пружності та з тріщинами) – це неремонтовані об'єкти в будь-якій експлуатаційній ситуації. Для умов депо або ремонтного заводу основні вузли одиниці рухомого складу (дизель, електричні машини й апарати, редуктори, ударно-зчіпні прилади тощо), як і одиниця рухомого складу загалом, – ремонтвані технічні об'єкти. Отже, під час аналізу, дослідження і розроблення заходів підвищення надійності необхідно оцінювати і визначати ситуації, в яких можливе або неможливе відновлення працездатності того чи іншого об'єкта.

Стани, в яких може перебувати технічний об'єкт (рухомий склад, його системи та елементи), визначають залежно від того, чи відповідає він вимогам, що висуваються, рис. 4.2.

Справним є такий стан технічного об'єкта, за якого він відповідає всім вимогам, установленим нормативно-технічною документацією. До нормативно-технічної, експлуатаційної та ремонтної документації стосовно тягового рухомого складу відносяться робочі креслення заводу-виготовлювача, технічні умови, ПТЕ залізниць, інструкції та правила технічного обслуговування та ремонту, зберігання та транспорту-

вання, ДСТУ та галузеві стандарти. Якщо хоча б одна з таких вимог не виконується, то об'єкт перебуває в несправному стані.

Справний технічний об'єкт обов'язково є працездатним; тобто придатним виконувати задані функції, зберігаючи задані параметри в межах, установлених нормативно-технічною документацією.

Якщо технічний об'єкт у разі порушення справності все ж виявляється придатним виконувати задані функції, зберігаючи вихідні параметри в межах, установлених нормативно-технічною документацією, то він також вважається *працездатним*. Якщо ж технічний об'єкт хоча б за одним із параметрів, що визначають його

придатність виконувати своє призначення із заданими показниками, не задовольняє вимогам, то він перебуває в *непрацездатному* стані.

Таким чином, поняття справності ширше, ніж поняття працездатності. Працездатний локомотив може бути несправним, проте така несправність не може бути суттєвою і не може порушувати нормального функціонування та експлуатації за планом.

Граничним є такий стан об'єкта, за якого його подальша експлуатація має бути припинена або стає неможливою. Ознаки (критерії) такого стану об'єкта встановлюються нормативно-технічною документацією. Неремонтуючий об'єкт досягає граничного стану в разі виник-

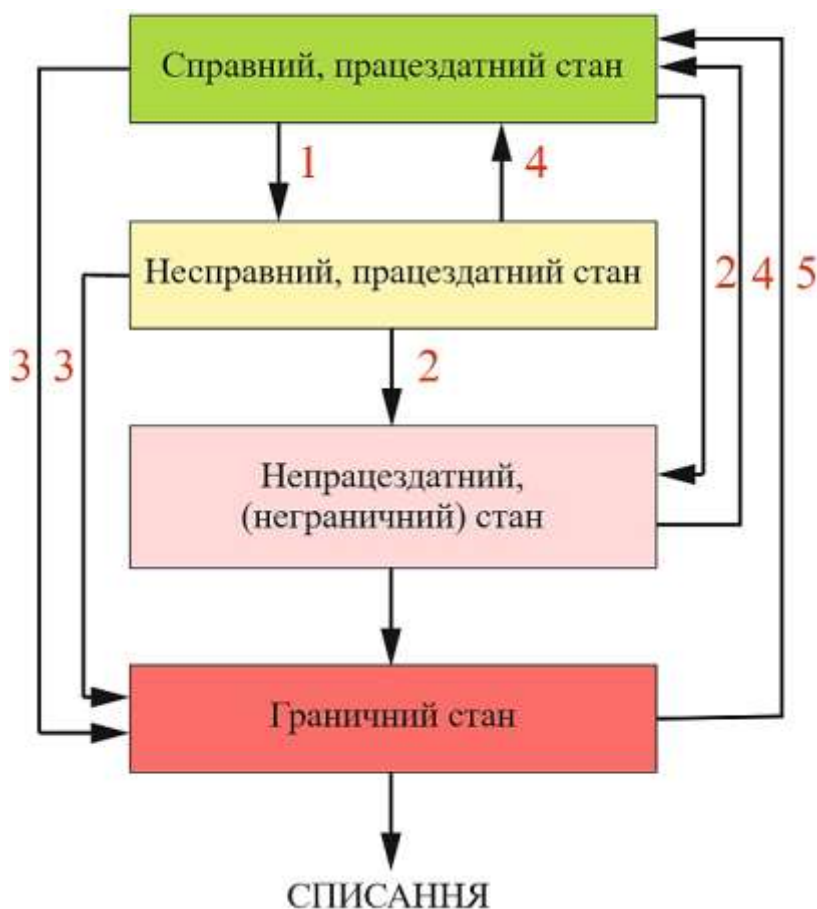


Рис. 4.2. Схема станів та подій:

1 – пошкодження; 2 – відмова; 3 – перехід об'єкта в граничний стан через неусувне порушення вимог безпеки, зниження ефективності експлуатації, морального старіння та інших факторів; 4 – відновлення; 5 – ремонт

нення відмови або в разі досягнення заздалегідь установленого граничного терміну служби чи сумарного наробітку.

Для об'єктів, що ремонтуються, граничний стан настає тоді, коли подальша експлуатація стає неможливою або недоцільною з однієї або кількох із таких причин: непереборні порушення вимог безпеки, безвідмовності; неможливість забезпечення потрібної ефективності використання технічного об'єкта; зношення та (або) старіння до такого стану, за якого ремонт вимагає неприпустимо великих витрат або не забезпечує необхідного рівня відновлення працездатності й справності.

Для рухомого складу, його складальних одиниць і деталей момент досягнення граничного стану визначається умовами забезпечення безпеки руху поїздів або обслуговуючого персоналу, неприпустимим зниженням ефективності використання та безвідмовності, неможливістю відновлення працездатності.

Таким чином, у процесі свого існування об'єкти можуть перебувати в одному із зазначених станів і переходити з одного стану в інший. Такі переходи називаються *подіями*, що розрізняються залежно від того, порушується чи ні справність або працездатність. Основними із зазначених подій, що відображають специфіку надійності одиниці рухомого складу, є *відмова* і *пошкодження*.

Згідно з галузевими стандартами *відмова* одиниці рухомого складу – це подія, що полягає в порушенні її працездатності, внаслідок якої потрібне відновлення або заміна складальних одиниць і деталей, або регулювання їхніх характеристик у період між плановими видами технічного обслуговування та ремонту або під час їхнього проведення, якщо це відновлення (заміна, регулювання) не входить до обсягу обов'язкових робіт і якщо необхідний для її виконання час або трудомісткість перевищують установлені норми.

Пошкодження – це подія, що полягає в порушенні справності без втрати працездатності одиниці рухомого складу, або її вузла, деталі.

Для тягового рухомого складу велике значення має розмежування і співвідношення понять відмови і пошкодження в різних умовах і ситуаціях. Пошкодження може бути суттєвим і несуттєвим залежно від наслідків переходу від справного стану до несправного. Якщо під час такого переходу виявляється порушеною працездатність, то сталося істотне пошкодження, тобто відмова. Перехід у несправний стан без порушення працездатності є несуттєвим ушкодженням (званим іноді *дефектом*). За несуттєвого пошкодження не повинно бути прояву жодної з перелічених у визначенні ознак відмови.

Експлуатація одиниці рухомого складу може бути продовжена до найближчого технічного обслуговування або ремонту, під час яких це пошкодження усувається без перевищення планового обсягу робіт. Однак в експлуатації тягового рухомого складу можливі випадки, коли несуттєві пошкодження окремих деталей можуть перейти в категорію істотних. Наприклад, поверхнєве пошкодження ізоляції електричної машини або апарата протягом деякого часу може не позначатися на їхній працездатності, але надалі може призвести до пробою ізоляції і до відмови не тільки зазначених вузлів, а й локомотива в цілому.

Ознакою відмови або віднесення пошкодження до відмови є необхідність проведення ремонту будь-якого виду або робіт із заміни складальної одиниці чи деталі. При цьому визначальним для класифікації події у вигляді відмови одиниці рухомого складу є неможливість виконання чергової поїздки через наявність суттєвого пошкодження. Пошкодження, виявлене під час виконання планового технічного обслуговування або ремонту деталі, що спричинило завищення обсягу робіт, вважається *прихованою відмовою* цієї деталі. Якщо ж це пошкодження призводить до збільшення простою або трудомісткості ремонту одиниці рухомого складу понад установлені норми, то таке пошкодження вважається *прихованою відмовою* одиниці рухомого складу у цілому.

Таким чином, дефект може існувати ще до початку експлуатації (виробничий брак) або з'явитися під час роботи. Пошкодження – наслідок дії дефекту, зносу чи аварійних впливів, а відмова це кінцевий результат, коли об'єкт втрачає працездатність. Взаємозв'язок понять «дефект», «пошкодження» та «відмова» відповідно до ДСТУ 2860-94 наведено у табл. 4.1.

Критеріями відмови¹, за допомогою яких встановлюється подія як порушення працездатності, є такі прояви: невиконання показників графіка руху поїздів (швидкості, часу ходу по дільницях, стоянок за поїзду); факт відновлення працездатності одиниці рухомого складу локомотивною бригадою в шляху прямування без порушення графіка руху поїздів; необхідність виконання непланового ремонту; перевищення встановленого обсягу робіт із відновлення, заміни, регулювання будь-якої складальної одиниці рухомого складу на плановому технічному обслуговуванні або ремонті, що викликає при цьому збільшення часу простою або трудомісткості ремонту одиниці рухомого складу у порівнянні з нормами, наведеними у нормативній та (або) конструкторській (проектній) документації.

¹ Критерій відмови – ознака чи сукупність ознак порушення працездатного стану об'єкта, встановлені у нормативній та (або) конструкторській (проектній) документації.

Взаємозв'язок понять «дефект», «пошкодження» та «відмова»

Поняття	Визначення за [2]	Характер прояву	Приклад
<i>Дефект</i>	Кожна окрема невідповідність об'єкта встановленим вимогам	Може бути як конструкційним (виробничим), так і експлуатаційним; не обов'язково має фізичне руйнування	Невірний розмір отвору, відхилення від форми, відсутність маркування, використання несертифікованого матеріалу
<i>Пошкодження</i>	Подія, яка полягає у порушенні справного стану об'єкта коли зберігається його працездатність	Має фізичний характер: механічні, теплові, хімічні зміни	Тріщина у рамі, вм'ятина в кузові, вищербина (скол) зубця шестерні, знос підшипника
<i>Відмова</i>	Подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта	Є наслідком критичного пошкодження чи сукупності дефектів; призводить до зупинки або некоректної роботи	Поломка двигуна, розрив ресори, заклинювання буксового підшипника, вихід з ладу гальмівної системи

Слід зауважити, що треба розрізняти відмови одиниці рухомого складу у цілому та її складальних одиниць. Якщо відмова складальної одиниці не викликає наслідків у вигляді зазначених критеріїв відмови, то це не означає відмови одиниці рухомого складу. Якщо в результаті відмови складальної одиниці проявився хоча б один із критеріїв відмови рухомого складу, сталася одночасно і відмова одиниці рухомого складу у цілому. Особливе місце посідає випадок порушення працездатності одиниці рухомого складу, коли жодна з її складальних одиниць не відмовила (сходження з рейок, зіткнення, аварія).

Дослідження, аналіз, оцінка надійності рухомого складу, складальних одиниць і деталей неможливі без ретельного документального обліку фактів порушення працездатності. Такий облік вимагає використання часткових критеріїв, якісних характеристик відмов і пошкоджень, тобто визначення характеру, причин, наслідків і способів їх усу-

нення. Практикою експлуатації та теоретичними узагальненнями встановлено, що причинами відмов можуть бути недоліки конструкції, низька якість виготовлення та використання матеріалів, порушення правил обслуговування та ремонтів, вплив підвищених навантажень і зовнішніх (кліматичних) умов, руйнування допоміжних і сполучених деталей, природні процеси зношування та старіння.

4.3.2. Класифікація відмов

Характер виникнення відмови – це фізичний, хімічний або інший процес, що викликав відмову.

За *типом* (характером зміни можливості виконання рухомим складом або елементом його конструкції робочих функцій) відмови поділяють на:

- відмови *функціонування* це коли виконання основних функцій об'єктом припиняється (наприклад: повна відмова дизель-генератора через руйнування колінчастого вала; заклинювання буксового підшипника з блокуванням обертання колісної пари; поломка автозчепу, що унеможлиблює формування поїзда; обрив гальмівної магістралі, що робить гальма непридатними); це функціональна надійність;

- відмови *параметричні* це коли деякі параметри об'єкта змінюються у неприпустимих межах (наприклад: зниження тиску масла у масляній системі дизеля нижче допустимого значення; зменшення потужності тягового електродвигуна через деградацію ізоляції; знос гребенів коліс до граничних розмірів; зменшення ефективності гальмівної системи через витік повітря; зниження міцності кузова через корозійне пошкодження несучих елементів); це параметрична надійність.

Переважними відмовами є параметричні, коли параметри виробу виходять за встановлені в технічній документації межі, але сам виріб ще в змозі з деякими відхиленнями виконувати покладені на нього функції. У таких випадках користуються сукупністю ознак або вказують у технічній документації критерії (відмінні ознаки) відмови або пошкодження. Критерієм зазвичай є порушення певним параметром установленого допуску. Наприклад, правильне функціонування струмоприймача можливе тільки за певного натискання на контактний дріт.

Зокрема, для одиниць рухомого складу найважливішими є відмови функціонування, пов'язані з необхідністю його відчеплення в неплановий ремонт, а для верстатів, наприклад, параметричні відмови, пов'яза-

ні з виходом основного параметра (точності функціонування) за поле допуску.

Основні *ознаки класифікації відмов*:

- швидкість виникнення;
- причина виникнення;
- спосіб проявлення;
- характер усунення;
- наслідки відмов;
- можливість подальшого використання об'єкта;
- характер виявлення;
- час виникнення;
- характер взаємозв'язку відмов (залежності відмов);
- за впливом відмови на перевізний процес;
- за ступенем небезпеки.

Розглянемо докладніше кожен із класифікаційних ознак.

За **швидкістю виникнення**¹ (характеру зміни основного параметра) бувають:

– *раптова*² відмова – відмова, що проявляється у різкій (миттєвій) зміні характеристик об'єкта. Раптові відмови зазвичай виникають унаслідок механічних пошкоджень елементів, таких як тріщини при крихкому руйнуванні, пробії ізоляції, обриви тощо, і не мають помітних ознак наближення. Вони характеризуються стрибкоподібною зміною значень одного або декількох заданих параметрів виробу внаслідок збігу несприятливих факторів і дії випадкових зовнішніх навантажень, що перевищують розрахункові режими роботи машини. Така відмова може також статися через поступове накопичення пошкоджень, які не можна заздалегідь виявити наявними в експлуатації технічними засобами. Наприклад, поступове зростання втомної тріщини в елементах конструкції екіпажної частини рухомого складу призводить до раптового руйнування елемента рами візка, пружних елементів пружного підвішування, елементів тягового приводу, колісних пар; нестача або

¹ В деяких публікаціях під час класифікації вказаних відмов ця ознака називається не «швидкість виникнення», а «характер виникнення», що робить означення суперечливим. По-перше, ці відмови належать до експлуатаційних, які можна визначати тільки у разі тривалих випробувань у часі. Тому ознака «швидкість» тут більш доречна. По-друге, під час застосування об'єкта за призначенням більш важливою і доцільною для таких відмов є ознака «можливість їх прогнозування». А для поступових відмов, які розрізняють за швидкістю їх виникнення, таке прогнозування можливе.

² Раптова відмова – це відмова, яку неможливо передбачити попередніми дослідженнями чи технічним оглядом.

витік мастила – до раптового руйнування сепаратора або вкладишів підшипників; корозія зварного з'єднання в мікросхемі – до раптового обриву кола тощо. Причиною виникнення раптової відмови можуть бути неправильні дії бригади, що обслуговує, і ремонтного персоналу депо. Як правило, причини, що викликають раптові відмови, не повторюються в різних екземплярах однотипних машин. Через непередбачуваність дії факторів, що спричиняють появу раптових відмов, імовірність їх виникнення не залежить від тривалості попереднього періоду роботи системи, деталі або елемента;

– *поступова*¹ відмова – відмова, що відбувається у результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкта. Поступові відмови переважно зумовлені старінням і втомою металів, зношуванням поверхонь сполучених деталей, поступовим витрачання резерву. Так, ізоляція електричних машин і апаратів з часом втрачає еластичність, стає крихкою, відбувається зниження її опору; гумові та гумометалеві деталі втрачають пружні властивості, розшаровуються; мастильні матеріали густіють, метали піддаються корозії. Так, 80 % відмов механічних систем виникають через зношування. Втома і старіння матеріалу призводять до зміни його структури, погіршення міцності та пружних характеристик. Усі зазначені процеси можуть відбуватися одночасно. Так, поступове розтріскування лакового покриття на друкованих платах систем керування призводить до проникнення вологи на поверхню струмопровідних елементів та їхньої корозії. Отже, поступові відмови можна вважати природним наслідком експлуатації машин.

Імовірність виникнення поступової відмови протягом заданого часу залежить від тривалості попереднього періоду експлуатації виробу. Чим більший цей період, тим більша імовірність появи відмови. Тому розроблення методів прогнозування поступових відмов є одним з основних завдань теорії та практики надійності.

Чіткої межі між раптовими та поступовими відмовами часто провести не вдається. Механічні, хімічні та фізичні процеси, що становлять причини відмов, зазвичай протікають у часі досить повільно. Так, втома тріщина в стінці котла цистерни, що зародилася з тріщиноподібного дефекту, повільно зростає в процесі експлуатації. Це зростання в принципі може бути простежено засобами неруйнівного контролю.

¹ Поступова відмова – це відмова, спричинена поступовими змінами значень одного чи декількох параметрів об'єкта. Поступову відмову можна передбачити попередніми дослідженнями чи технічним оглядом, інколи її можна уникнути заходами технічного обслуговування.

Однак власне відмова (настання течії) відбувається раптово. Якщо з якихось причин своєчасне виявлення ненаскрізної тріщини виявилось неможливим, то відмову доведеться визнати раптовою. У міру вдосконалення розрахункових методів і засобів моніторингу (безперервного контролю під час експлуатації) та діагностування, що дозволяють своєчасно виявляти джерела можливих відмов і прогнозувати їхній розвиток у часі, дедалі більша кількість відмов належатиме до категорії поступових.

Під час оцінювання надійності об'єктів згідно з [2] рекомендується враховувати лише ті відмови, які не стали наслідком порушення правил і норм експлуатації. Проте специфічні умови виготовлення та експлуатації одиниць рухомого складу зумовили необхідність окремого обліку такого виду відмов. Для цього стандарти встановлюють їхню класифікацію за **причиною виникнення**:

– *конструкційна* відмова – спричинена недосконалістю або порушенням установлених правил і (або) норм проєктування та конструювання об'єкта (наприклад, незахищеність вузлів тертя, наявність концентраторів напружень, неправильний вибір матеріалів і мастил тощо). До конструкційних, зокрема, можуть бути віднесені відмови одиниці рухомого складу та її елементів, спричинені екстремальними навантаженнями в експлуатації, що значно перевищують рівень розрахункових навантажень, прийнятих із техніко-економічних міркувань для проєктування. Наприклад, в експлуатації трапляються швидкості зіткнення вагонів під час маневрово-гіркових операцій, що досягають 15–18 км/год, проти 5 км/год, регламентованих «Правилами технічної експлуатації» (ПТЕ) залізниць, і, відповідно, екстремальні поздовжні сили та прискорення в кузові, які значно перевищують розрахункові за нормами. З огляду на те, що імовірність виникнення таких навантажень невелика, а проєктування деталей вагонів на ці навантаження призведе до істотного збільшення витрат металу, ваги тари та зменшення ефективності експлуатації, розрахункові навантаження приймають значно нижчими (такими, що відповідають швидкості співудару 7,5 км/год). Як наслідок, уже на етапі проєктування свідомо закладається деяка імовірність відмов, які в цьому разі можуть бути віднесені до розряду конструкційних;

– *виробнича (виготовлювальна)* відмова – спричинена невідповідністю виготовлення об'єкта його проєкту або нормам виробничого процесу (наприклад, пошкодження поверхонь під час складання, задири, потрапляння абразиву у вузли тертя, дефекти зварних з'єднань тощо);

– *експлуатаційна* відмова – виникає через порушення встановлених правил і умов експлуатації або внаслідок непередбачених зовнішніх

впливів під час використання, чи незапланованої високої інтенсивності застосування (наприклад, використання виробу не за призначенням, поява перевантажень тощо);

– *ремонтна* відмова – виникає внаслідок порушення правил технічного обслуговування та ремонту в депо або на ремонтному заводі.

За **способом проявлення** відмови бувають:

– *випадкові*, обумовлені непередбачуваними подіями, наприклад, випадковими перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи керування і т.п. (наприклад, раптовий обрив контактного дроту живлення електровоза через падіння стороннього предмета, заклинювання підшипника тягового електродвигуна внаслідок потрапляння сторонніх частинок, відмова системи керування через збій у мікропроцесорному модулі, вихід з ладу гальмівного циліндра через розрив діафрагми від внутрішнього дефекту);

– *систематичні*, що виникають з поступовим нагромадженням ушкоджень і обумовлені закономірними та немінучими явищами: зношуванням, старінням, корозією, утомленістю і т. п. Можна простежити систему виникнення будь-якої систематичної відмови. Ця відмова однозначно пов'язана з певною причиною, яку можна усунути лише після модифікації проекту чи виробничого процесу, правил експлуатації, документації чи інших чинників, що можна врахувати, наприклад, підрегулюванням, налаштуванням тощо.

Прикладами систематичних відмов є наступні: передчасне зношування зубців зубчастих коліс редуктора через конструктивну невідповідність профілю зуба навантаженням у реальних умовах експлуатації, що можна усунути зміною конструкції або технологією термообробки; поступове зниження ККД системи охолодження дизеля через недостатню площу теплообмінника, закладену в проєкті, що усувається лише модернізацією радіатора чи вентилятора; руйнування буксових підшипників через недостатній захист від забруднень у конструкції ущільнень – потребує зміни конструкції або технології обслуговування; регулярне розрегулювання паливної апаратури через вібрації, що не враховані під час проєктування кріплень; передчасна втомна тріщина в рамі візка у місцях концентрації напружень, передбачених проєктом, – усувається тільки зміною конструкції чи посиленням елементів; систематичне руйнування фрикційних клинів у пружному підвішуванні через недостатню міцність матеріалу – виправляється лише зміною матеріалу або конструкції клинів; прискорена корозія елементів кузова через конструктивні «кишені» для накопичення вологи й бруду – усувається зміною конструкції або введенням захисних покриттів.

Випадковими зазвичай бувають раптові відмови, а систематичними найчастіше бувають поступові відмови.

За **характером усунення** бувають:

– *стійкі* відмови, які неможливо усунути легким або швидким способом, для відновлення працездатності потрібен тривалий ремонт або заміна елементів, вузлів чи структури об'єкта;

– *самоусувні* відмови – легкі відмови, що легко усуваються. Самоусувні відмови можуть виникати багаторазово (виникаючі/зникаючі), тоді їх відносять до повторюваних (перемежованих) відмов. Повторювана відмова – це самоусувна відмова одного й того самого характеру, що виникає багаторазово. До самоусувних відмов належить збій або одноразова відмова. Збій – це одноразова відмова, яка сама зникає або яку незначним втручанням усуває оператор. Збій усувається в результаті природного повернення об'єкта у працездатний стан чи без участі, чи за нетривалої участі оператора, причому час усунення відмови малий або близький до нуля.

За **наслідками** виділяють:

– *важку* відмову (наслідки відмови – викликає вторинні відмови суміжних вузлів);

– *середню* відмову (наслідки відмови – не викликає відмови суміжних вузлів, тобто вторинних відмов);

– *легку* відмову (наслідки відмови: для відновлення працездатності не потребує тривалого ремонту або заміни елементів, вузлів чи структури об'єкта).

Залежно **від характеру наслідків відмови локомотивів** поділяють на чотири види, які наведено в табл. 4.2.

Також відмови локомотивів класифікуються **за наслідками по родах**.

Відмова *першого роду* призводить до порушення *працездатного стану локомотива*¹, спричинена несправностями, внаслідок яких

¹ Ознаками (критеріями) непрацездатного стану є факти псування у шляху прямування та виконання непланового ремонту.

Псуванням одиниці тягового рухомого складу в шляху прямування вважається його пошкодження або відмова, через яку допущено вимушену зупинку поїзда понад 30 хв на перегоні, а також на проміжній станції (де не передбачено стоянку поїзда розкладом руху поїздів). Якщо при цьому рух поїзда продовжено шляхом заміни або за допомогою іншого локомотива, таке ушкодження або відмова вважається псуванням з вимогою допоміжного локомотива («резерву»). Якщо під час усунення пошкодження або відмови одиниці тягового рухомого складу на проміжній станції локомотивною бригадою витрачено на 30 хв більше, ніж передбачено розкладом, то такий випадок також вважається псуванням.

допущено зрив графіку руху до однієї години. При цьому усунення несправності не потребує постановки локомотива на неплановий ремонт.

Таблиця 4.2

Види відмов локомотива

Вид відмови	Характеристики відмов	Критерії відмов
1	2	3
I виду	Критична відмова – така, що раптово приводить локомотив у граничний стан і створює загрозу для життя і здоров'я людей, а також для навколишнього середовища	Зломи рам кузова, шворня, рами візка, осі та центру колісної пари, руйнування корпусу букси, шестерень тягового редуктора, злам підвіски тягового редуктора
II виду	Істотна відмова, що тягне за собою економічний збиток, який не можна порівняти з витратами на ремонт	Стан локомотива, що виключає можливість ведення поїзда (псування в шляху прямуювання)
III виду	Істотна відмова, яку важко усунути і яка призводить до значних матеріальних збитків	Стан локомотива, що вимагає виконання непланового ремонту з простом (витратами праці) більше за критеріальну величину, зазначену в нормативно-технічній документації (наприклад, демонтаж дизеля або тягового генератора, викочування візків тощо)
IV виду	Несуттєва відмова, яку легко усунути, яка не призводить до значних матеріальних збитків	Стан локомотива, що вимагає виконання непланового ремонту з простом (витратами праці), меншим за критеріальну величину, зазначену в нормативно-технічній документації (наприклад, усунення «землі» в низьковольтному колі тощо)

Примітка. Неплановим ремонтом вважається заходження одиниці рухомого складу в депо для усунення відмови та її наслідків у період між (або на) ТО-3, ТО-4 і плановими ремонтами (або на планових ремонтах) з переведенням його до неексплуатованого парку.

Відмова *другого роду* призводить до порушення працездатного стану, спричинена несправностями, внаслідок яких допущено зрив графіку руху поїздів на одну годину і більше. При цьому усунення несправності потребує постановки на неплановий ремонт несправного локомотива з переведенням його в неробочий парк.

За **можливістю подальшого використання** об'єкта бувають:

- *повні* відмови, що виключають спроможність об'єкта функціонувати до їх усунення (об'єкт не виконує жодної з потрібних функцій);
- *часткові* відмови, за яких об'єкт можна частково використовувати (об'єкт може виконувати частину потрібних функцій).

Якщо багатофункціональна система має кілька рівнів працездатності, то повна відмова під час виконання однієї з окремих, незалежних функцій означає для всієї системи лише часткову відмову. Це відбувається тоді, коли втрачено одну чи кілька функцій, але решта продовжують працювати. Наприклад, локомотив, що може тягнути поїзд, забезпечувати гальмування та живлення вагонів електроенергією. Якщо, наприклад, вийшла з ладу система електроживлення вагонів, але тяга й гальма працюють, то для всієї системи це не повна, а лише часткова відмова – адже інші функції зберегли працездатність. Так, коли у пасажирському вагоні відмовила система кондиціонування – перевезення пасажирів можливе, але без клімат-контролю, така відмова вагона також вважається частковою.

За **характером виявлення (легкістю виявлення)** вирізняють:

- *явні (очевидні)* відмови – відмови, що виявляються візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностування під час підготовки об'єкта до використання чи у процесі його використання за призначенням;
- *неявні (приховані, латентні)* відмови – відмови, що не виявляються візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностування, але виявляються під час проведення технічного обслуговування чи спеціальними методами діагностики. Запізніле виявлення прихованої відмови може призвести до некоректної обробки інформації, неправильного виконання алгоритмів, формування помилкових керуючих сигналів та інших негативних наслідків. Наприклад: якщо у локомотиві відмовив датчик температури охолоджувальної рідини, але система не розпізнала цю несправність вчасно, то автоматика може продовжувати роботу двигуна в умовах перегріву. Це призведе до хибних рішень системи керування, і, як наслідок, до пошкодження двигуна.

За **часом виникнення** виділяють:

- відмови *під час приробітку*, що виникають у початковий період експлуатації;
- відмови *під час нормальної експлуатації*;
- відмови *від зношування*, викликані необоротними процесами зношування деталей, старіння матеріалів та ін., які виникають після довготривалого застосування.

За **характером взаємозв'язку відмов (залежності відмов)** відмови поділяють на:

- *залежна* – це відмова об'єкта, спричинена прямо чи непрямо відмовою або несправністю іншого об'єкта. Наприклад, часті відмови підшипників і кінематичних пар редукторів можуть спричинятися відмовами елементів системи, що забезпечує їх мастилом;

- *незалежна* – це відмова об'єкта, не спричинена прямо чи непрямо відмовою або несправністю іншого об'єкта.

- *відмова із загальної причини* – це особливий вид залежної відмови, при якій кілька елементів, структур або каналів системи виходять з ладу одночасно або в короткий проміжок часу через одне спільне джерело несправності (єдиний фактор – внутрішній чи зовнішній), але не внаслідок послідовності подій (тобто не каскадного ефекту). Це серйозна проблема, тому при аналізі безпеки та надійності важливо враховувати не лише індивідуальні, а й колективні відмови. Наприклад, відмовою із загальних причин вважається: одночасне пошкодження кількох тягових електродвигунів локомотива внаслідок короткого замикання у високовольтному колі через дефект ізоляції, спричинений вологістю; вихід з ладу двох незалежних каналів системи керування через помилку в програмному забезпеченні бортового комп'ютера; масова корозія елементів кузовів у групи вагонів, які експлуатувалися на лініях із підвищеною солоністю повітря, без належного захисту покриття; одночасне руйнування автозчепів кількох вагонів через використання партії деталей з виробничим дефектом металу; масовий знос гребенів коліс через помилкову технологію обточування на деповському обладнанні.

За **впливом відмови на перевізний процес** відмови можуть бути¹:

- *першої категорії* – відмова, що призвела до затримки пасажирського, приміського або вантажного поїзда на перегоні (станції) на одну годину і більше або бо призвели до транспортних подій або подій,

¹ Під час класифікації відмови об'єкта *за впливом на перевізний процес* враховують:

- затримки як першого, так і наступних (кожного окремо) поїздів (пасажирських, приміських, вантажних), допущені через цю відмову об'єкта;

- найбільший час затримки окремого взятого поїзда (пасажирського, приміського, вантажного) врахований: за місцем виникнення відмови об'єкта; за відправленням поїзда зі станцій формування або обороту; за проходженням поїзда в межах диспетчерських дільниць (для вантажних або приміських поїздів) або в межах залізниць (тільки для пасажирських поїздів); по прибуттю на станцію призначення або обороту (тільки для пасажирських поїздів).

пов'язаних із порушенням правил безпеки руху та експлуатації залізничного транспорту;

– *другої категорії* – відмова, що призвела до затримки пасажирського, приміського або вантажного поїзда на перегоні (станції) тривалістю від шести хвилин до однієї години, або до погіршення експлуатаційних показників;

– *третьої категорії* – відмова, яка не має наслідків, що належать до відмов першої та другої категорії.

За **ступенем небезпеки** відмова буває:

– *небезпечна* відмова, це коли залізнична техніка переходить зі справного, працездатного або частково працездатного стану в небезпечний стан¹. Наприклад, під час руху поїзда на ділянці з великим ухилом може статися розрив гальмівної тяги, важеля або заклинювання розгальмованого положення гальмівних колодок на одному з вагонів. У цьому випадку навіть при команді машиніста на гальмування гальмівний механізм окремого вагона не спрацює, і його колеса залишаться вільними. За високої швидкості та значної маси складу це може призвести до перевантаження гальмівної системи інших вагонів, збільшення гальмівного шляху та втрати контролю над поїздом. Така відмова створює реальну загрозу безпеці руху, оскільки поїзд не зможе своєчасно зупинитися у небезпечній ситуації, що може спричинити зіткнення, сходження з рейок або інші тяжкі наслідки;

– *безпечна* відмова не створює небезпечної ситуації для людей, руху поїздів і інфраструктури, бо об'єкт автоматично переходить у безпечний стан (або зберігає безпеку) навіть за рахунок втрати/обмеження функцій. Наприклад, у процесі руху поїзда може статися пошкодження гальмівної магістралі поїзда або з'єднувальної арматури, що призводить до раптового витoku стисненого повітря з гальмівної магістралі. У поїздах з пневматичною автоматичною гальмівною системою гальмівна магістраль постійно перебуває під тиском, який підтримує розгальмований стан гальм. Зниження тиску нижче встановленої межі автоматично спричиняє заповнення гальмівних циліндрів повітрям із допоміжних резервуарів, унаслідок чого гальмівні колодки притискаються до коліс, і поїзд починає контрольоване гальмування до повної зупинки. Така відмова, попри вихід з ладу окремого елемента

¹ Небезпечний стан – несправний стан залізничної техніки, за якого виникають ризики заподіяння шкоди життю і здоров'ю громадян, майну фізичних та юридичних осіб, державному та муніципальному майну, навколишньому середовищу, життю і здоров'ю тварин і рослин, що перевищують допустимі рівні ризику.

гальмівної системи, не переводить поїзд у небезпечний стан, а навпаки – забезпечує його зупинку, що відповідає принципу fail-safe, коли у разі несправності система переходить у стан, що мінімізує ризики для безпеки руху.

Таким чином, будь-яку відмову доцільно описувати повним профілем її ознак – за характером виникнення (раптова чи поступова), за причиною (конструкційна, виробнича, експлуатаційна, ремонтна), за впливом на працездатність (повна чи часткова), за спостережуваністю (явна чи неявна), за повторюваністю (разова чи повторювана), а також за труднощістю усунення (легка/самоусувна чи стійка). Наприклад, можлива раптова експлуатаційна повторювана часткова явна відмова, що проявляється під час приробітку вузла; або – поступова конструкційна легка часткова неявна відмова, яка з'являється в умовах нормальної експлуатації. Ілюстративно це може бути й так: поступова корозійна (експлуатаційна) часткова неявна повторювана відмова пневмомагістралі вагона з періодичними провалами тиску; раптова виробнича повна явна стійка відмова автозчепу через прихований дефект литва; або раптова систематична (зумовлена конструктивною концентрацією напружень) часткова явна відмова кріплення обладнання на локомотиві.

У низці пристроїв принципово важливо розрізняти два протилежні типи відмов за результатом дії: «немає сигналу/дії, коли вони потрібні» та «є сигнал/дія, коли їх бути не повинно». Для логічних модулів, дискретних датчиків, регуляторів і систем контролю це означає, що відмова може проявитися або у втраті необхідного вихідного сигналу (скажімо, кінцевик дверей не підтверджує «зачинено», і поїзд не отримує дозволу на відправлення; датчик швидкості коліс перестає видавати імпульси, і система протиюзу не активується), або у формі помилкового спрацювання (наприклад, «хибно вільна» ділянка рейкового кола подає дозвільний сигнал за фактичної зайнятості; датчик температури «залипає» на заниженому значенні, і автоматика не обмежує потужність при перегріві). В електричних та електронних елементах протилежність проявів класична: обрив кола (провідність падає до нуля, на елементі з'являється ненульова напруга) проти короткого замикання (опір прямує до нуля в певному напрямку); для залізничних прикладів це може бути обрив у колі котушки контактора гальм (команда не виконується) або «коротке» у силовому колі вентилятора охолодження (автоматичний захист відключає коло, охолодження зупиняється). Аналогічно для гальмівного розподільника: або він не подає повітря при команді «гальмувати» (втрата дії), або самовільно подає повітря без команди (помилкова дія – мимовільне гальмування);

для автоматичних систем керування локомотивом – або команда тяги не доходить до модуля (втрата дії), або команда на підвищення потужності «залипає» без запиту (помилкова дія, яку мають перехоплювати захисти). Отже, коректний опис відмови як поєднання ознак і очікуваного результату (втрата чи хибна дія) робить аналіз ризику прозорим і напряду підказує, що саме змінювати: конструкцію, алгоритми, регламенти обслуговування чи налаштування.

Загалом відмова повною мірою характеризується причиною, ознаками (зовнішніми проявами), технічною сутністю і наслідками.

Аналіз причин відмов проводять з метою розроблення пропозицій і заходів щодо усунення або зниження впливу відмов на ефективність функціонування виробів. Аналіз причин відмов виробу охоплює: установлення факту відмови; визначення причини відмови; розроблення заходів щодо запобігання відмові.

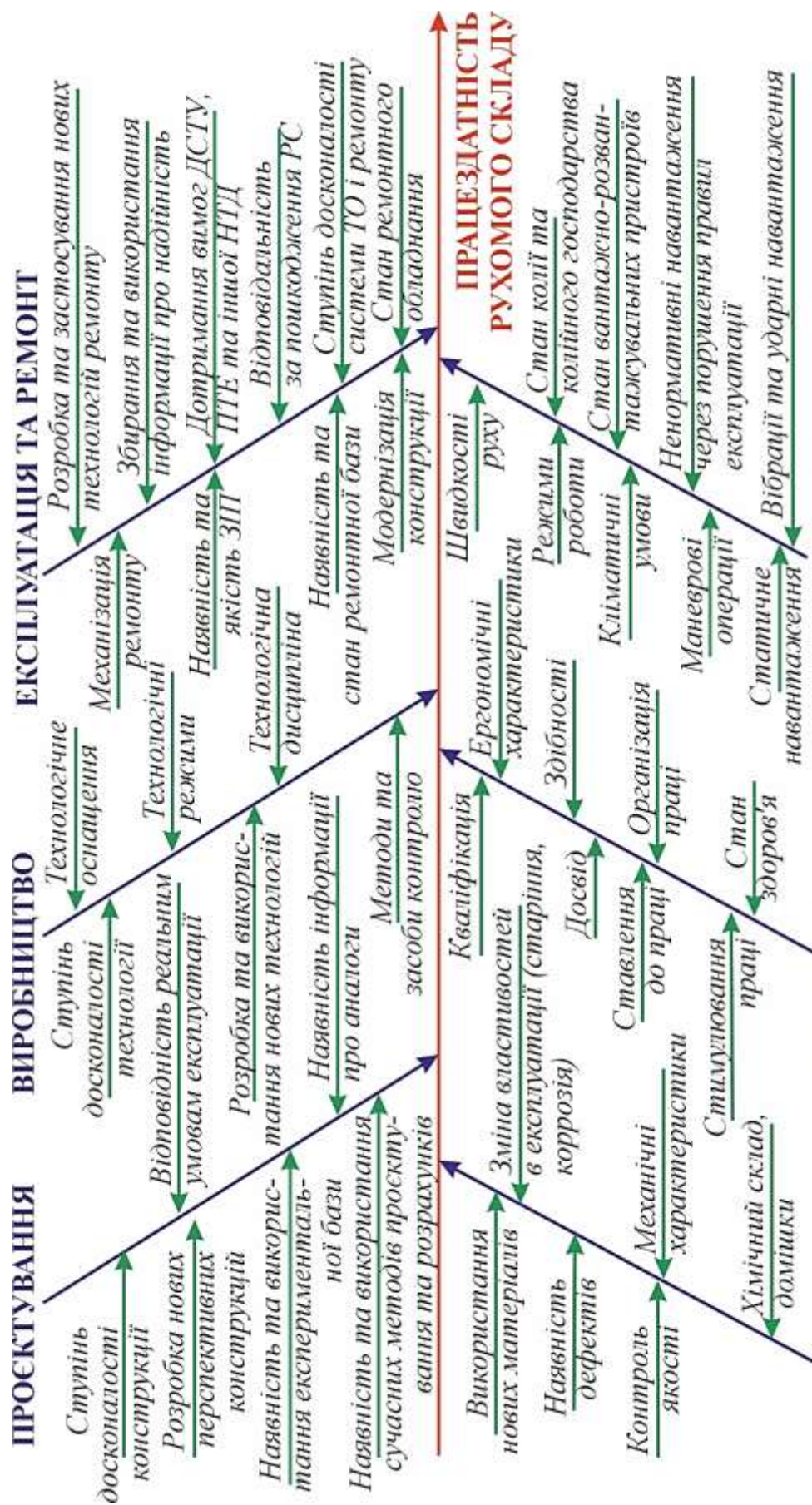
Наочною формою аналізу причин відмов є схема причинно-наслідкових зв'язків – діаграма Ісікави ¹(Ishikawa, fishbone). У цій схемі кінцевий результат (показник надійності, критерій відмови) зображується центральною стрілкою. Явища (чинники, принципи), що впливають на кінцевий результат, зображуються стрілками, спрямованими до центральної лінії. На рис. 4.3 представлено діаграму Ісікава, що виявляє вплив різних чинників і подій на рівень працездатності рухомого складу (центральна стрілка).

Заходи щодо запобігання відмов розробляють, як правило, для найслабших елементів і вузлів, відмови яких мають найбільшу частоту і лімітують надійність виробу загалом.

¹ Діаграма Ісікави (також відома як «риб'яча кістка» або діаграма причинно-наслідкових зв'язків) – це метод графічного відображення та систематизації всіх можливих причин, які можуть призвести до виникнення певної проблеми або відхилення у роботі технічного об'єкта, процесу чи системи. Метод був розроблений японським професором Каору Ісікавою у 1960-х роках та знайшов широке застосування в інженерії, управлінні якістю та технічній діагностиці.

Принцип побудови діаграми полягає в тому, що в «голові риби» зазначається досліджувана проблема або показник (наприклад, відмова вузла чи зниження надійності обладнання), а від неї відходить головна стрілка («хребет»), до якої приєднуються великі гілки – основні категорії причин. Традиційно виділяють такі групи: Люди, Методи, Матеріали, Обладнання, Навколишнє середовище та Управління. Кожна з категорій деталізується на підпричини, які позначаються меншими гілками.

Діаграма Ісікави дозволяє комплексно дослідити проблему, виявити як очевидні, так і приховані чинники, що впливають на результат, а також сприяє колективному аналізу та пошуку ефективних рішень. У сфері надійності рухомого складу вона використовується для аналізу причин відмов та визначення напрямів підвищення ефективності технічного обслуговування й ремонту.



МА Рис. 4.3. Причинно-наслідкові зв'язки працездатності рухомого складу (діаграма Ісікави)

Виявлення слабких елементів часто проводять за допомогою діаграми Парето¹, що являє собою гістограму, за віссю абсцис якої відкладають види відмов, а за віссю ординат – абсолютну або відносну (нормовану) кількість відмов кожного виду.

Проілюструємо використання діаграми Парето на прикладі аналізу надійності вантажних вагонів. Розподіл середнього числа відмов (відчеплень кожного вагона робочого парку в поточний ремонт) за типами вагонів, наведений на рис. 4.4, *а*), показує, що найбільша кількість відмов припадає на піввагони. Визначення середньої кількості відмов за основними вузлами піввагонів, побудоване у вигляді діаграми Парето на рис. 4.4, *б*), свідчить про те, що найслабшим вузлом піввагона є кузов, на частку якого в середньому припадає 3400 відмов (на 1000 вагонів робочого парку). На другому місці перебуває колісна пара, за видами відмов якої виконано окремий аналіз, представлений у вигляді діаграми Парето на рис. 4.4, *в*). Цей аналіз показує, що найбільша кількість (75 %) відчеплень піввагонів у поточний ремонт, пов'язаних з відмовами колісних пар, припадає на несправності гальмівного походження (навари, повзуни, кільцеві вироблення на поверхні катання колеса).

Як видно з рис. 4.3, діаграми Парето можна побудувати або з використанням даних про середню кількість відмов (відчеплень одиниць рухомого складу робочого парку в поточний відчіпний ремонт) за рік (*а*), або на основі інформації про середню кількість відмов вузлів на 1000 одиниць рухомого складу за рік (*б*), або на основі розподілу кількості відмов вузлів за їхніми видами, причинами, походженням тощо (*в*).

Проведений у такий спосіб аналіз дає змогу розробити ефективні заходи щодо ліквідації найсуттєвіших видів відмов шляхом усунення їхніх причин, модернізації вузла і раціонального технічного обслуговування та ремонту.

¹ Діаграма Парето – це метод візуалізації та аналізу даних, що дозволяє впорядкувати причини, події або відмови за ступенем їхнього впливу на результат і зосередитися на найважливіших із них. Її створення ґрунтується на принципі Парето, або правилі «80/20», яке стверджує, що близько 80 % наслідків обумовлені приблизно 20 % найзначущіших причин. Такий підхід дає змогу швидко виокремити ті чинники, усунення яких принесе найбільший ефект.

Побудова діаграми Парето передбачає розташування причин у вигляді вертикальних стовпчиків у порядку зменшення їхньої значущості (наприклад, за кількістю випадків, частотом простою чи відсотком впливу). Поряд із цим додається крива накопиченого підсумку, яка наочно показує, яку частку загального результату становлять перші кілька ключових чинників. Аналіз такої діаграми дозволяє чітко визначити «критичну малу частину» проблем, вирішення яких забезпечить значне покращення роботи системи.

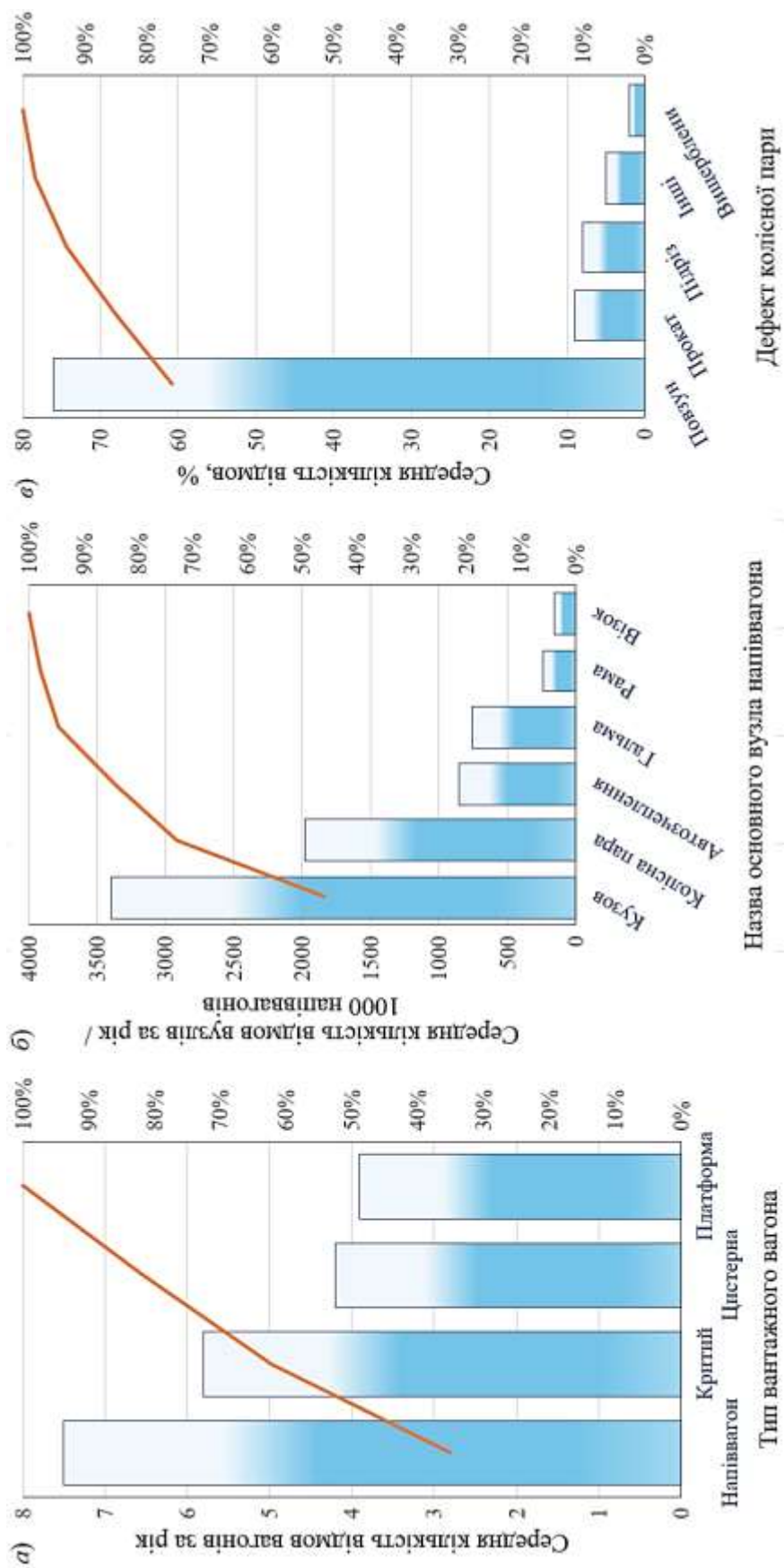


Рис. 4.4. Діаграми Парето розподілу відмов:

а) за типом вантажних вагонів; б) за основними вузлами напіввагона; в) за видом дефекту колісних пар

4.3.3. Якість і властивості надійності рухомого складу

Якість локомотива як технічної системи, призначеної здійснювати тягу поїздів, оцінюють такими показниками, як потужність, швидкість, сила тяги, витрата палива або електроенергії, масла, піску тощо. Якість вантажного вагона як технічної системи, призначеної здійснювати перевезення вантажів оцінюється такими основними показниками, як вантажопідйомність, об'єм кузова, маса тари вагона. Якість пасажирського вагона як технічної системи, призначеної здійснювати перевезення пасажирів оцінюється такими основними показниками, як пасажиромісткість, маса тари вагона, конструкційна швидкість.

Для повної оцінки експлуатаційних якостей одиниці рухомого складу цього недостатньо. Одиниця рухомого складу (локомотив, вагон) повинна мати здатність зберігати перераховані показники в процесі використання, що і називається властивістю *«надійність»*. Ця властивість одиниці рухомого складу, як і будь-якої іншої технічної системи, є комплексною і формується такими окремими властивостями: безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю і збережуваністю.

Безвідмовність – це властивість одиниці рухомого складу (вузла, деталі) безперервно зберігати працездатність протягом певного часу або певного наробітку в конкретних умовах експлуатації як у період його використання за призначенням, так і в періоди зберігання, відстою в резерві, транспортування.

Довговічність – властивість одиниці рухомого складу (вузла, деталі) довго зберігати працездатність до настання граничного стану за встановленої системи технічного обслуговування та ремонту.

Ремонтпридатність одиниці рухомого складу (вузла, деталі) – це пристосованість до запобігання, виявлення та усунення відмов і пошкоджень, проведення ремонтів і технічного обслуговування. Таким чином, у ремонтпридатного об'єкта можна відновити його працездатність.

Збережуваність – це властивість одиниці рухомого складу (вузла, деталі) **безперервно** зберігати справність і працездатність протягом терміну зберігання і транспортування, тобто до початку.

Готовність – це властивість об'єкта, бути здатним виконувати потрібні функції, в заданих умовах у будь-який час чи протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами. Ця властивість залежить від поєднання властивостей безвідмовності, ремонтпридатності та забезпечення технічного обслуговування і ремонту. Необхідні зовнішні ресурси, що не належать до ресурсів технічного обслуговування та ремонту, не впливають на властивість готовності об'єкта.

4.4. Загальна характеристика показників надійності рухомого складу

Кількісний показник надійності – це кількісний вимір однієї або декількох властивостей, що становлять надійність технічного об'єкта, тобто безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності, збережуваності або їх поєднання. Чисельне значення показників надійності може бути виражене розмірними або безрозмірними величинами, воно може бути різним залежно від умов експлуатації та етапів існування об'єкта. Формулювання показника надійності зазвичай відображає і спосіб визначення його чисельного значення розрахунковим або дослідним шляхом.

Основними випадковими величинами, за допомогою яких у процесі експлуатації тягового рухомого складу визначають рівень надійності, є тривалість роботи до відмови або тривалість роботи між відмовами t або l , кількість відмов n за певний період роботи, тривалість відновлення працездатності τ , величина витрат праці, коштів, матеріалів, енергії на відновлення працездатності та ін. Крім зазначених, при визначенні показників надійності широко використовують поняття «напрацювання» або «наробіток», під яким розуміють обсяг виконаної технічним об'єктом корисної роботи, як правило, пропорційний часу роботи.

Напрацювання вимірюється залежно від роду роботи, від виду виконуваної об'єктом функції в одиницях не тільки часу (мотогодини), а й довжини, об'єму, маси, площі, кількості увімкнень-вимкнень, кількості спрацьовувань, розміру виробленої (або спожитої) енергії тощо. Загальне поняття напрацювання стосовно тягового рухомого складу може бути конкретизовано (години роботи t , кілометри пробігу l , тонно-кілометри виконаної перевізної роботи Ql , кількість перероблених на маневрах вагонів та ін.). Залежно від умов експлуатації та цілей аналізу розрізняють добове, місячне напрацювання (наробіток), наробіток до першої відмови, наробіток між відмовами тощо. Якщо робота здійснюється з перервами, то враховується сумарний наробіток. Окремо може враховуватися наробіток в тому чи іншому режимі (наробіток на холостому ході, наробіток під навантаженням).

Кількісні показники, що характеризують надійність об'єкта, підрозділяються на два типи: одиничні та комплексні.

Одиничним показником надійності є показник, що характеризує одну з властивостей, які складають надійність об'єкта.

Комплексний показник характеризує кілька властивостей, що складають надійність об'єкта.

Показники надійності одиниці рухомого складу, як і будь-якого іншого виробу, не можуть вимірюватися безпосередньо; їх визначають за апріорною (статистичною) інформацією про ушкодження та відмови елементів обладнання статистичними методами за математичними виразами.

У табл. 4.3 наведено основні кількісні показники властивостей надійності.

Таблиця 4.3

Кількісні показники властивостей надійності

Властивість надійності	Показники надійності
1	2
<i>Одиничні показники надійності</i>	
Безвідмовність	Імовірність безвідмовної роботи
	Імовірність відмови
	Імовірність безвідмовної роботи в інтервалі часу
	Густина розподілу часу безвідмовної роботи (густина імовірності відмови)
	Інтенсивність відмов
	Середній наробіток (напрацювання) до відмови
	Середній наробіток (напрацювання) на відмову
	Параметр потоку відмов
Довговічність	Пробіги між ТО і ПР
	Призначений ресурс
	Гарантійний термін служби
	Гамма-відсотковий ресурс
	Термін служби до списання
Ремонтпридатність	Середній час простою в ремонті
	Середній час відновлення
	Середня трудомісткість відновлення
	Середня вартість ремонту
Збережуваність	Термін збережуваності
	Середній час справного стану під час зберігання

Закінчення табл. 4.2

1	2
<i>Комплексні показники надійності</i>	
Коефіцієнт готовності	
Коефіцієнт оперативної готовності	
Коефіцієнт простою	
Коефіцієнт технічного використання локомотивів	
Коефіцієнт витрат на технічне обслуговування та ремонт	
Відсоток несправних локомотивів	
Ремонтомісткість	

Також всі показники надійності підрозділяються на два типи – позитивні та негативні.

Позитивний показник надійності – показник, числове значення якого збільшується зі зростанням надійності об'єкта. До позитивних показників відносяться, наприклад, імовірність безвідмовної роботи, гама-відсотковий ресурс, середній наробіток до відмови, середній ресурс або термін служби, коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання.

Негативний показник надійності – показник, числове значення якого зменшується зі зростанням надійності об'єкта. До негативних показників відносяться, наприклад, імовірність відмови, інтенсивність відмов, параметр потоку відмов, коефіцієнт простою.

Запитання до самоконтролю

1. У чому полягає відмінність між апіорним і апостеріорним аналізом надійності?
2. Які типи визначень показників надійності застосовують на різних етапах життєвого циклу технічного об'єкта?
3. Яке значення має правильний вибір кількісних показників надійності для проектування та експлуатації технічних систем?
4. Які особливості експлуатації рухомого складу впливають на вибір показників надійності?
5. Навіщо у процесі оцінки надійності використовують математичні моделі?
6. Які основні властивості включає поняття надійності?

7. Чому величини, пов'язані з надійністю (наприклад, тривалість безвідмовної роботи), вважаються випадковими?
8. Яке значення мають кількісні показники надійності для практики експлуатації техніки?
9. Які задачі можна розв'язати на практиці завдяки визначенню показників надійності?
10. Чому надійність розглядається як комплексна багатостороння властивість?
11. Які загальні вимоги до кількісних показників надійності висуває практика?
12. Чим зумовлюється необхідність застосування імовірнісних методів у теорії надійності?
13. За якими принципами слід підходити до вибору показників надійності рухомого складу?
14. Для чого потрібна модель функціонування технічного пристрою?
15. Що розуміється під процесом функціонування технічного пристрою?
16. Чим можуть відрізнятися окремі періоди використання технічного пристрою?
17. Які технічні параметри визначають здатність функціонування тепловоза?
18. Що означає вихід робочих параметрів за межі допустимих значень?
19. Чи завжди відмова одного з параметрів призводить до повної втрати працездатності пристрою?
20. Які чинники слід враховувати для повної характеристики стану технічного виробу в період експлуатації?
21. Як класифікують фактори, що впливають на надійність технічного пристрою?
22. Яка відмінність між ремонтowanими та неремонтowanими елементами рухомого складу?
23. Що включає в себе поняття «експлуатація» ремонтovanого технічного об'єкта?
24. Які три етапи використання технічних пристроїв за призначенням виділяють?
25. Що таке структурна й енергетична надмірність у контексті локомотива?
26. Який стандарт встановлює терміни та визначення в галузі надійності технічних об'єктів?

27. У чому полягає різниця між системою та елементом технічного об'єкта?
28. Чому важливо враховувати рівень ієрархії під час аналізу надійності?
29. Що означає «ремонтпридатність» технічного об'єкта згідно з ДСТУ 2860-94?
30. У яких ситуаціях ремонтпридатний об'єкт може виявитися фактично неремонтпридатним?
31. Наведіть приклади елементів рухомого складу, які завжди вважаються неремонтпридатними.
32. Які складальні одиниці рухомого складу можна вважати ремонтпридатними в умовах депо?
33. Які стани технічного об'єкта визначаються нормативно-технічною документацією?
34. У чому різниця між справністю та працездатністю?
35. Який стан називають граничним? За якими критеріями він визначається?
36. Чому граничний стан має особливе значення для об'єктів, що ремонтуються?
37. Що таке відмова згідно з галузевими стандартами?
38. У чому полягає різниця між відмовою та пошкодженням?
39. Що вважається критерієм переходу пошкодження в категорію відмови?
40. Які відмови називаються прихованими?
41. На які категорії поділяються відмови за родом наслідків?
42. Які характеристики має відмова першого, другого, третього та четвертого виду?
43. Що вважається псуванням одиниці рухомого складу?
44. Що таке неплановий ремонт? Які події до нього призводять?
45. Як класифікуються відмови за причинами згідно з галузевими стандартами?
46. Які заходи вживаються для усунення відмов і пошкоджень?
47. Які основні показники використовують для оцінки якості тягового рухомого складу?
48. Чому лише технічні параметри (потужність, витрата палива тощо) не дають повної оцінки якості?
49. Які складові формують поняття «надійність»?
50. Як визначаються безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережуваність?
51. Що таке кількісний показник надійності?

52. Які властивості технічного об'єкта можуть характеризуватися кількісними показниками надійності?
53. В якому вигляді можуть бути виражені числові значення показників надійності?
54. Які основні випадкові величини використовуються для оцінювання надійності під час експлуатації рухомого складу?
55. Що таке «напрацювання» або «наробіток»?
56. У яких одиницях може вимірюватися наробіток?
57. Що означає поняття «характер виникнення відмови»?
58. Які види відмов розрізняють за типом (характером зміни можливості виконання робочих функцій)? Наведіть приклади.
59. У чому полягає різниця між відмовами функціонування та параметричними відмовами?
60. Що таке «переважні відмови» і які критерії їх визначення?
61. Які ознаки класифікації відмов ви можете назвати?
62. Чим раптова відмова відрізняється від поступової за визначенням ДСТУ 2860-94?
63. Які основні причини виникнення раптових відмов у рухомому складі?
64. Які фізичні процеси призводять до поступових відмов і як їх можна прогнозувати?
65. Що таке конструкційна відмова? Наведіть приклади з залізничної техніки.
66. Чим відрізняються виробничі, експлуатаційні та ремонтні відмови?
67. Як класифікуються відмови за способом проявлення?
68. Які приклади систематичних відмов наведено в тексті?
69. Чим відрізняються стійкі та самоусувні відмови?
70. Які відмови вважають повторюваними?
71. Які наслідки характерні для важких, середніх і легких відмов?
72. Як класифікуються відмови локомотива за видами (I–IV вид)?
73. Що розуміють під відмовами першого та другого роду?
74. У чому полягає різниця між повними та частковими відмовами?
75. Як визначають явні та неявні відмови, і чим небезпечне пізнє виявлення прихованої відмови?
76. Які відмови відносять до залежних, незалежних та відмов із загальної причини?
77. Які приклади відмов із загальної причини наведені у тексті?
78. Як класифікують відмови за впливом на перевізний процес?

79. У чому полягає різниця між відмовами першої, другої та третьої категорії?
80. Дайте визначення небезпечної відмови та наведіть приклад.
81. Дайте визначення безпечної відмови та наведіть приклад.
82. Які типи наробітку розрізняють залежно від умов експлуатації?
83. Яка різниця між одиничним та комплексним показником надійності?
84. Які методи використовуються для розрахунку показників надійності?
85. Назвіть основні одиничні показники, що характеризують безвідмовність рухомого складу.
86. Які показники використовуються для оцінки довговічності технічного об'єкта?
87. Які основні кількісні показники характеризують ремонтпридатність рухомого складу?

Безвідмовність рухомого складу

5.1. Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів

Під час розв'язання завдань надійності складальних одиниць рухомого складу суттєве значення має визначення їх як об'єктів відновлюваних чи невідновлюваних, ремонттованих чи неремонттованих, що повністю залежить від рішення, прийнятого у разі відмови об'єкта.

Як і загалом для будь-яких технічних пристроїв, згідно з [2], *відновлюваним* у певній конкретній ситуації є той об'єкт, працездатність якого в даних умовах може бути відновлена. Специфічною в цьому випадку є ситуація, в якій оцінюється можливість або неможливість відновлення. Зазвичай йдеться про роботу об'єкта під час руху на перегоні.

Складальні одиниці, деталі рухомого складу, несправності та відмови яких легко усуваються в умовах депо, пунктів технічного обслуговування і навіть на тягових коліях депо, виявляються невідновлюваними на перегоні через обмеженість часу відновлення та відсутність необхідних засобів і умов.

Існують складальні одиниці (бандажі колісних пар, поршні дизелів тощо), які втрачають властивості відновлюваності при досягненні певного наробітку, коли їх розміри або стан виходять за допустимі межі. Однак більшість складальних одиниць рухомого складу можна вважати як відновлювані або невідновлювані за всьому терміну служби до граничного стану. Наприклад, елементи електроніки, напівпровідникові вентиля, підшипники кочення, осі колісних пар, лампи освітлення та інші подібні деталі, поршневі кільця дизелів (за зносом і зломом), фільтрувальні елементи, зчеплення пружних і еластичних структур (за розтріскуванням) – суттєво невідновлювані об'єкти у будь-якій експлуатаційній ситуації. Для умов депо або ремонтного виробництва великі складальні частини рухомого складу, такі як дизелі, електричні машини і апарати, редуктори, рами, ударно-зчіпні пристрої тощо, – відновлюва-

ні об'єкти. Отже, під час аналізу, дослідження і розроблення заходів підвищення надійності необхідно оцінювати і визначати ситуації, в яких можливе або неможливе відновлення працездатності об'єкта.

Безвідмовність будь-якого технічного виробу (об'єкта) характеризується наробітком до відмови – тривалістю його безвідмовної роботи, тобто тривалістю роботи об'єкта від моменту введення в експлуатацію до відмови.

Оскільки наробіток до відмови залежить від безлічі випадкових чинників – якості виготовлення виробу, режимів його навантаження, порядку чергування різних експлуатаційних режимів, кліматичних і метеорологічних умов експлуатації, кваліфікації обслуговуючого персоналу, він є випадковою величиною.

Невідновлювані об'єкти характеризуються технічним напрацюванням до відмови – тривалістю їхнього працездатного стану, тобто проміжком часу роботи об'єкта від моменту введення в експлуатацію до відмови.

Повною (вичерпною) характеристикою випадкової величини є *закон її розподілу*, тобто співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини та відповідними їм імовірностями.

Наробіток до відмови є безперервною випадковою величиною, для якої закон розподілу задають або у вигляді функції розподілу $F(l)$ (інтегральна форма), або – густини розподілу $f(l)$ (диференціальна форма).

Ці характеристики містить у собі всі можливі значення наробітку або тривалості робіт і відповідні їм точкові значення наступних кількісних показників безвідмовності.

5.1.1. Імовірність безвідмовної роботи

Імовірність безвідмовної роботи¹ за пробіг l (або час t)

$$P(l) = P[L > l] = 1 - F(l) = 1 - \int_0^l f(l) dl, \quad (5.1)$$

де $F(l)$ – функція розподілу наробітку (пробігу) до відмови L ;

¹ Цей показник характеризує імовірність нез'явлення події (відмови) та використовується для оцінювання імовірності безвідмовної роботи до першої відмови. Його застосовують як до невідновлюваних, так і до відновлюваних об'єктів.

$f(l)$ – густина розподілу наробітку до відмови L .

Таким чином, імовірність безвідмовної роботи $P(l)$ – це імовірність того, що пробіг до відмови L більший за заданий або що за пробіг l відмови не буде. Очевидно, що ця імовірність має зменшуватися зі зростанням l , що випливає з (5.1).

На початку експлуатації справної одиниці рухомого складу $P(0) = P[L > 0] = 1$, як імовірність «достовірної» події – об'єкт не може відмовити за від'ємної тривалості роботи, тобто відмовить за певного додатного значення L . Із ростом пробігу l імовірність $P(l)$ зменшуватиметься на підставі властивостей функції розподілу: $F(l_2) > F(l_1)$, якщо $l_2 > l_1$. На цій же підставі $P(\infty) = P[L > \infty] = 0$, тобто імовірність нескінченно великої величини тривалості безвідмовної роботи дорівнює нулю. Характер зміни імовірності безвідмовної роботи залежно від наробітку показано на рис. 5.1. Як видно з рисунка, крива $P(l)$ є спадною залежно від наробітку і при $l = 0$ $P(l) = 1$, при $l \rightarrow \infty$ $P(l) = 0$.

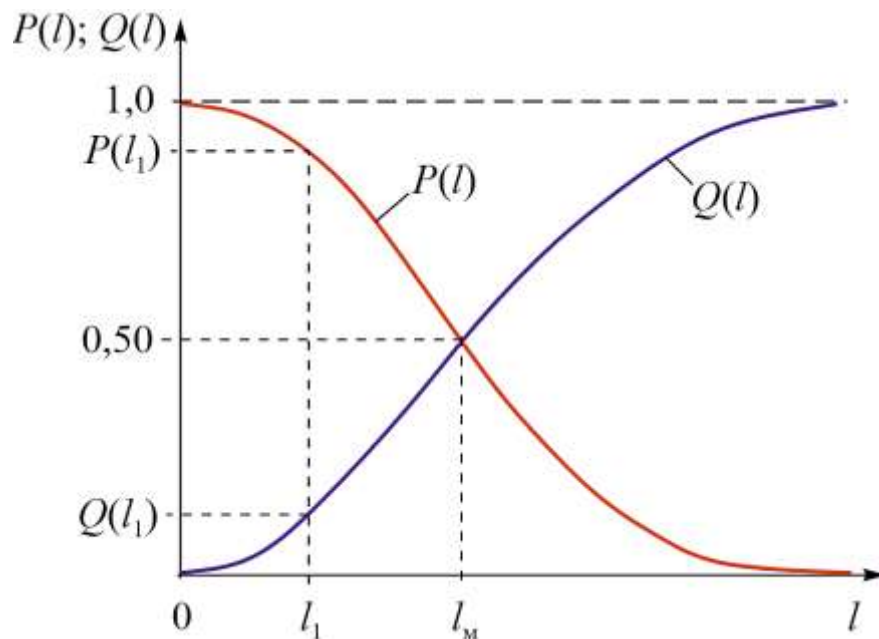


Рис. 5.1. Графіки зміни імовірності безвідмовної роботи $P(l)$ і імовірності відмови $F(l)$ залежно від напрацювання

Функцію $P(l)$, що характеризує основний показник безвідмовності, називають ще *функцією надійності*.

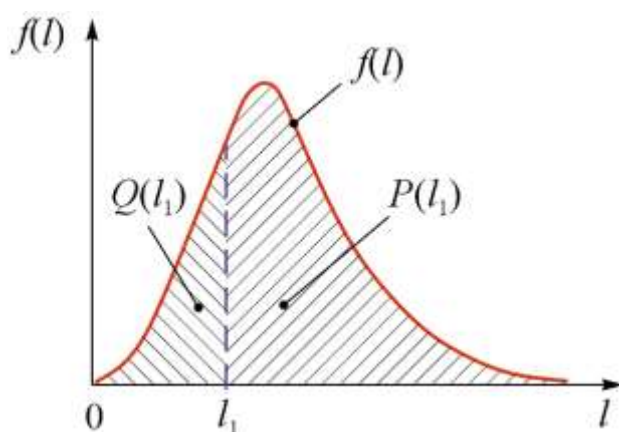


Рис. 5.2. Імовірність безвідмовної роботи та імовірність відмови за наробіток l_1

Геометрично імовірність безвідмовної роботи за наробіток l чисельно дорівнює площі під кривою функції $f(l)$ в інтервалі від l_1 до ∞ , рис. 5.2, тобто

$$P(l_1) = \int_{l_1}^{\infty} f(l) dl. \quad (5.2)$$

Статистична оцінка імовірності безвідмовної роботи об'єкта $P^c(l)$ ¹ за наробіток l

$$P^c(l) = \frac{N - n(l)}{N}, \quad (5.3)$$

де N – кількість об'єктів, працездатних на початку випробувань (у початковий момент часу) або кількість об'єктів, поставлених на випробування;

$n(l)$ – кількість об'єктів, що відмовили за наробіток l .

Формула (5.3) характеризує відносну кількість об'єктів, які пропрацювали без відмови за наробіток l . Точність статистичної оцінки $P^c(l)$ за формулою (5.3) збільшується зі зростанням N . За великого числа об'єктів N статистична оцінка показника $P^c(l)$ практично збігається з істинною імовірністю $P(l)$. Тому для отримання достовірних оцінок обсяг вибірки N має бути досить великий.

Вибір допустимого² значення імовірності безвідмовної роботи $P(l)$. Допустиме значення $P(l)$ вибирається залежно від ступеня небезпеки відмови. Наприклад, для відповідальних виробів рухомого складу (колiсна пара, буксовий вузол, гальмівне обладнання та ін.), відмова яких

¹ Літера «с» у верхньому індексі позначає статистичну оцінку (за результатами випробувань).

² Допустима імовірність безвідмовної роботи чисельно характеризує небезпеку наслідків відмови. Наслідки відмови визначають відповідальність деталі.

може призвести до катастрофічних наслідків (аварія, катастрофа, невиконання відповідального завдання), допустимі значення функції надійності доходять до $P(l) = 0,99$, а в авіаційній техніці – і до $P(l) = 0,9999$ і вище, тобто практично дорівнюють одиниці.

Якщо наслідки відмови пов'язані зі значним економічним збитком (підвищені простой в ремонті, робота на знижених режимах, роботи з погіршеними параметрами), допустиме значення $P(l)$ може бути $\geq 0,9$. У разі відмов із незначними економічними втратами, допустиме значення $P(l)$ може бути значно нижчим.

Несправність колісної пари, наприклад, часто тягне за собою відмову одиниці рухомого складу в експлуатації. Залежно від причини відмови будуть і різні наслідки. Якщо це раптовий злам осі, то матиме місце аварія. Якщо перевищення нормативного значення вихідного показника, наприклад прокат колеса, понад 9 мм або інша серйозна несправність, то матимуть місце різні за величиною економічні наслідки. Звідси рекомендоване допустиме значення $P(l)$ для осі колісної пари за наробіток 10 років має бути не менше: 0,99 – для пасажирських вагонів; 0,989 – для поштових, багажних і вагона-електростанції; 0,983 – для вантажних та ізотермічних вагонів.

Переваги показника імовірності безвідмовної роботи $P(l)$. Імовірність безвідмовної роботи $P(l)$ найповніше визначає надійність рухомого складу та його вузлів через те, що цей показник:

- характеризує залежність надійності виробу від часу і режиму експлуатації;
- досить просто отримують розрахунковим шляхом і оцінюють у процесі випробування;
- використовується для розрахунку надійності складних систем у процесі їх проектування.

У практичній діяльності важливо вміти також визначати імовірність явища події (виникнення або відсутність відмови) на інтервалі Δl , що примикає до інтервалу l , на якому відмови об'єкта не сталося. Таку імовірність називають *умовною* – імовірність безвідмовної роботи Δl , за умови, що об'єкт пропрацював безвідмовно до початку цього інтервалу.

У цьому разі використовується теорема множення імовірностей, згідно з якою імовірність добутку (спільного здійснення) подій A і B дорівнює добутку імовірності $P(A)$ події A на умовну імовірність $P_A(B)$ події B . При цьому імовірність $P_A(B)$ обчислюють у припущенні, що подія A настала.

Тоді, за теоремою множення імовірностей, імовірність безвідмовної роботи об'єкта за наробіток $(l_1 + \Delta l)$ між l_1 та l_2 , відповідно до рис. 5.3, буде

$$P(l_1 + \Delta l) = P(l_2) = P(l_1) \cdot P(l_1, l_2) = P(l_1) \cdot P(\Delta l), \quad (5.4)$$

де $P(l_2)$ – імовірність безвідмовної роботи об'єкта за наробіток l_2 ;
 $P(l_1)$ – імовірність безвідмовної роботи об'єкта за наробіток l_1 ;
 $P(l_1, l_2)$ – умовна імовірність безвідмовної роботи об'єкта за інтервал напрацювання від l_1 до l_2 ;
 $P(\Delta l)$ – умовна імовірність безвідмовної роботи об'єкта за інтервал напрацювання Δl .

Використання імовірності безвідмовної роботи $P(l)$ обумовлюється наступними причинами:

– для багатьох комплектуючих елементів рухомого складу $P(l)$ вказується в технічних умовах як основний показник надійності;

– для механічних вузлів і деталей, відмова яких може викликати відмову одиниці рухомого складу, при розрахунках за умовами зношування, статичної та циклічної міцності $P(l)$ використовується як основний показник надійності;

– показник $P(l)$ зв'язаний з основним показником, що використовується для оцінки надійності одиниць рухомого складу – параметром потоку відмов.

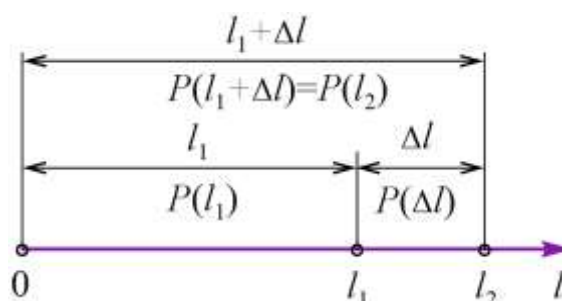


Рис. 5.3. До визначення умовної імовірності безвідмовної роботи на інтервалі Δl

5.1.2. Імовірність відмови

Імовірність відмови за наробіток l визначається за формулою:

$$Q(l) = F(l) = P[L \leq l] = \int_0^l f(l) dl = 1 - P(l), \quad (5.5)$$

тобто імовірність відмови як події, протилежної відсутності відмови за пробіг l , дорівнює різниці між одиницею та $P(l)$, вона збігається з функцією розподілу $F(l)$.

Відмова і відсутність відмови утворюють повну групу подій, який-небудь третій варіант результату відсутній. З (4.5) випливає, що імовірність відмови збігається з функцією розподілу тривалості роботи до відмови $F(l)$. Функцію $Q(l) = F(l)$ називають ще *функцією відмови*. За $l = 0$ $Q(0) = F(0) = 0$, збільшується зі зростанням l і за $l \rightarrow \infty$ $F(l) = 1$ (див. рис. 5.1). Крива функції відмов $Q(l)$ симетрична по відношенню до $P(l)$. Обидві криві перетинаються в точці, що відповідає середньому (медіанному) наробітку об'єкта l_m , за якої $P(l) = Q(l) = 0,5$.

Геометрично імовірність відмови за наробіток l чисельно дорівнює площі під кривою функції $f(l)$ в інтервалі від 0 до l , див. рис. 5.2, тобто

$$Q(l) = \int_0^l f(l) dl. \quad (5.6)$$

Статистична оцінка імовірності відмови об'єкта за наробіток l

$$Q^c(l) = \frac{n(l)}{N}. \quad (5.7)$$

Точність статистичної оцінки $Q^c(l)$ за формулою (5.7) збільшується зі зростанням N .

Приклад 5.1. Необхідно побудувати залежності функцій безвідмовної роботи $P(l)$ та відмови об'єкта $Q(l)$ від наробітку на основі результатів випробування 10 однакових об'єктів. Тривалість випробування – до відмови всіх 10 об'єктів. Кількість об'єктів, що відмовили, фіксується протягом кожної тисячі кілометрів наробітку. Результати випробування показано на рис. 5.4. На рис. 5.4 через l_i позначений наробіток i -го об'єкта до першої відмови – досягнення граничного значення будь-яким з його вихідних параметрів.

Розв'язання. Статистичні оцінки функцій безвідмовної роботи $P(l)$ та відмови об'єкта $Q(l)$ за наробіток:

– 1000 км при $n(1000) = 1$

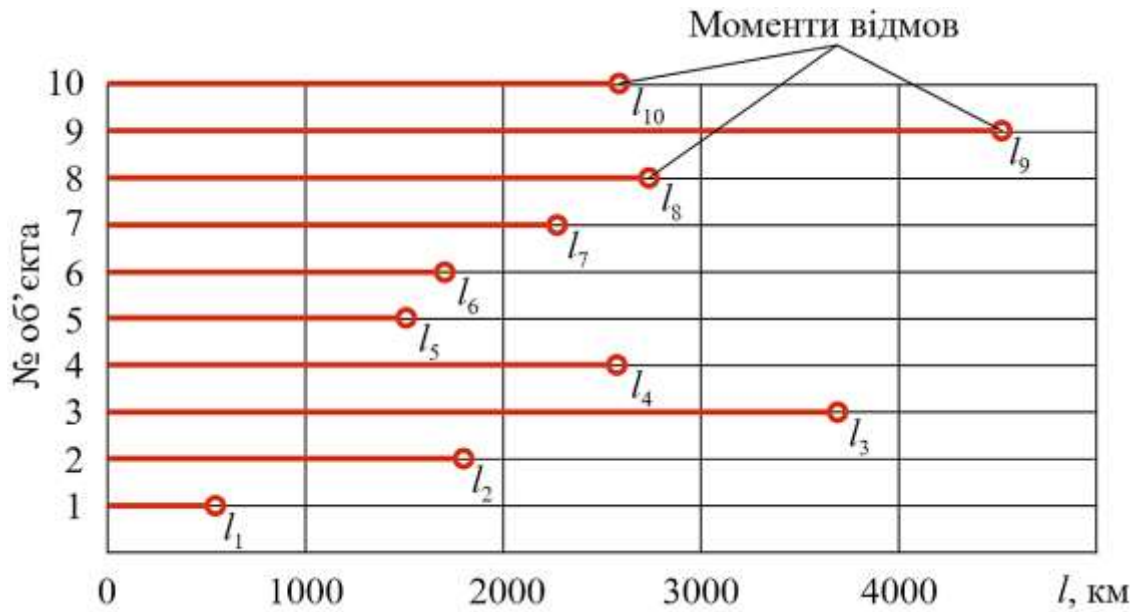


Рис. 5.4. Схема процесу випробувань

$$P^c(1000) = \frac{10-1}{10} = 0,9,^1 \quad Q^c(1000) = \frac{1}{10} = 0,1;$$

– 2000 км при $n(2000) = 4$

$$P^c(2000) = \frac{10-4}{10} = 0,6, \quad Q^c(2000) = \frac{4}{10} = 0,4;$$

– 3000 км при $n(3000) = 8$

$$P^c(3000) = \frac{10-8}{10} = 0,2, \quad Q^c(3000) = \frac{8}{10} = 0,8;$$

– 4000 км при $n(4000) = 9$

$$P^c(4000) = \frac{10-9}{10} = 0,1, \quad Q^c(3000) = \frac{9}{10} = 0,9;$$

¹ Якщо імовірність безвідмовної роботи виробу за наробіток $l = 1000$ км пробігу дорівнює 0,90, то це означає, що з великої кількості виробів даної моделі в середньому 90 % виробів пропрацюють без відмови не менше 1000 км (зі 100 виробів – 90, з 1000 – 900 тощо).

– 5000 км при $n(5000) = 10$

$$P^c(4000) = \frac{10-10}{10} = 0,0, \quad Q^c(3000) = \frac{10}{10} = 1,0.$$

У результаті випробування отримано емпіричні криві $P(l)$ і $Q(l)$, які наведені на рис. 5.5.

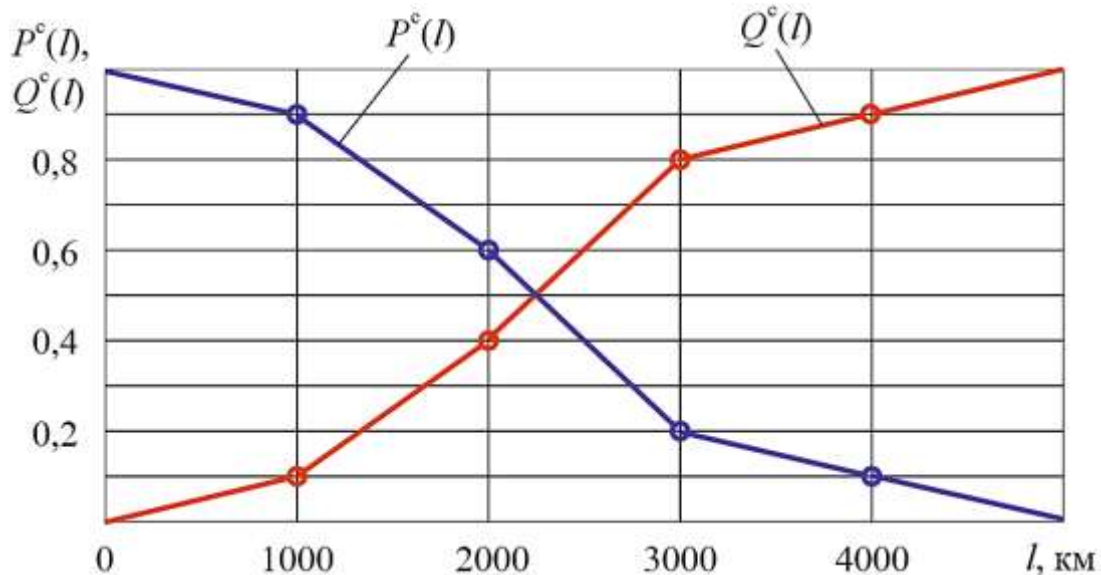


Рис. 5.5. Функції $P(l)$ і $Q(l)$, отримані за результатами випробувань

Для отримання більш достовірних оцінок $P(l)$ і $Q(l)$ необхідно збільшувати кількість спостережуваних об'єктів N .

Як впливає з графіка на рис. 5.5, за інтервал наробітку розглянутих об'єктів $l = 1000$ км ми маємо досить високу безвідмовність роботи, що дорівнює $P^c(1000) = 0,9$. При $l = 2000$ км значення $P^c(2000) = 0,6$, при $l = 3000$ км – $P^c(3000) = 0,2$ і т.д. Графік залежності $P^c(l)$ іноді називають «*кривою убутку*».

5.1.3. Частота відмов

Частота відмов є показником, що характеризує швидкість зміни імовірності відмов і імовірності безвідмовної роботи зі зростанням тривалості роботи

$$f(l) = F'(l) = \frac{dF(l)}{dl} = -P'(l) = -\frac{dP(l)}{dl}. \quad (5.8)$$

Частота відмов як показник безвідмовності збігається зі густиною розподілу тривалості роботи до відмови. Найбільші значення $f(l)$ відповідають інтервалу найімовірніших значень тривалості роботи до відмови. Графік функції $f(l)$ показано на рис. 5.6.

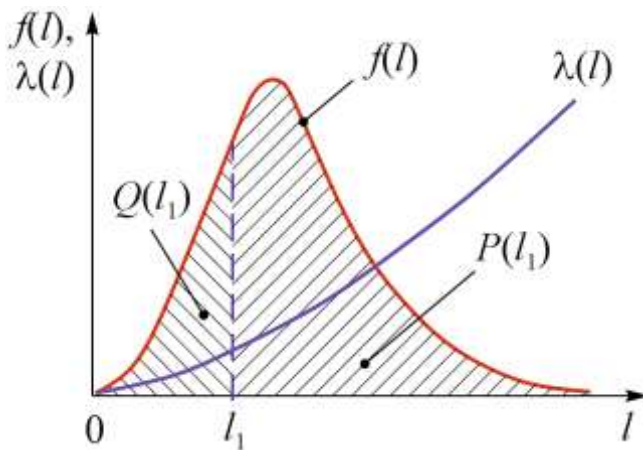


Рис. 5.6. Густина розподілу імовірності відмов $f(l)$ та інтенсивності відмов $\lambda(l)$ залежно від наробітку:

$Q(l_1)$, $P(l_1)$ – імовірність відмови і імовірність безвідмовної роботи за наробіток l_1

Характерним є те, що для всіх законів розподілу тривалості роботи до відмови елементів, схильних до «старіння», графік густини розподілу має зростаючу гілку і після максимуму – спадаючу гілку.

Це пояснюється тим, що в цьому діапазоні наробітку l кількість та, відповідно, і частота відмов зменшується внаслідок зменшення кількості елементів, які допрацювали до цього «віку». Наявність низхідної гілки графіка $f(l)$ не можна розуміти як зменшення «схильності» елементів до відмов у цьому діапазоні.

Чіткіше зміну «схильності» до відмов елементів характеризує показник інтенсивності відмов $\lambda(l)$.

Статистична оцінка частоти відмов за інтервал наробітку від l до $l + \Delta l$ визначається за формулою:

$$f^c(l, \Delta l) = \frac{n(l + \Delta l) - n(l)}{N \Delta l} = \frac{\Delta n(l, \Delta l)}{N \Delta l}, \quad (5.9)$$

де $n(l + \Delta l)$ – кількість об'єктів, що відмовили, за наробіток $(l + \Delta l)$;

$\Delta n(l, \Delta l)$ – приріст числа об'єктів, що відмовили, за інтервал наробітку від l до $(l + \Delta l)$;

Δl – величина розглянутого інтервалу наробітку.

5.1.4. Гамма-відсотковий наробіток до відмови¹

Відповідно до [2] *гамма-відсотковий наробіток до відмови* l_γ це наробіток, протягом якого відмова об'єкта не виникне з імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Під час оцінки імовірності безвідмовної роботи $P(l)$ вирішувалося пряме завдання – для заданого напрацювання l обчислювали імовірність безвідмовної роботи. При оцінці показника l_γ вирішується зворотнє завдання – визначення наробітку l , що відповідає заданій імовірності безвідмовної роботи.

Гамма-відсотковий наробіток до відмови l_γ визначається із рівняння:

$$P(l_\gamma) = \frac{\gamma\%}{100} = P[L > l_\gamma] = \int_{l_\gamma}^{\infty} f(l) dl, \quad (5.10)$$

де $P(l_\gamma)$ – задана імовірність безвідмовної роботи;

$[L > l_\gamma]$ – подія, що означає, що випадкова величина L прийме значення, більшого за l_γ , із заданою імовірністю γ ;

l_γ – шукане значення гамма-відсоткового наробітку до відмови;

$f(l)$ – функція розподілу густини наробітку до відмови.

Гамма-відсотковий наробіток до відмови l_γ можна визначати і за інтегральною функцією $F(l)$ (функцією розподілу наробітку до відмови), як корінь рівняння:

$$F(l_\gamma) = P[L \leq l_\gamma] = 1 - P(l_\gamma) = 1 - \frac{\gamma\%}{100}. \quad (5.11)$$

Як випливає з формули (5.11), гамма-відсоткове значення показника являє собою квантиль відповідного розподілу.

Статистичні оцінки для гамма-відсоткових показників можуть бути отримані на основі статистичних оцінок або безпосередньо, або після

¹ Цей показник використовується для невідновлюваних і відновлюваних об'єктів.

апроксимації емпіричних функцій відповідними аналітичними розподілами.

Якщо відомий теоретичний закон розподілу напрацювання до відмови та його параметри, то величину гамма-відсоткового наробітку l_γ розраховують за формулами:

– для нормального розподілу

$$l_\gamma = M[l] - z_\gamma S_\sigma; \quad (5.12)$$

– для експоненційного (показникового) розподілу

$$l_\gamma = \frac{1}{\lambda} (-\ln \gamma); \quad (5.13)$$

– для розподілу Вейбулла¹

$$l_\gamma = a (-\ln \gamma)^{1/b}, \quad (5.14)$$

де $M[l]$, S_σ – параметри нормального розподілу;

z_γ – квантиль нормованого нормального розподілу, що відповідає імовірності γ ;

λ – параметр експоненційного (показникового) розподілу (інтенсивність відмов);

a, b – параметри розподілу Вейбулла.

Як випливає з формул (5.12 – 5.14), гамма-відсотковий наробіток до відмови являє собою нижню довірчу межу розсіювання напрацювання до відмови за односторонньої довірчої імовірності $\alpha_0 = \gamma = \gamma\%/100$.

¹ У науковій літературі можна зустріти як назву «розподіл Вейбулла», так і «розподіл Вейбулла–Гнеденка». Перша є короткою та загальноприйнятою у світовій практиці й пов’язана з ім’ям Валодді Вейбулла, який запропонував емпіричну форму розподілу. Назва «Вейбулла–Гнеденка» використовується для підкреслення внеску Б. В. Гнеденка, який здійснив повне математичне обґрунтування цього розподілу та сформулював умови його застосування в теорії надійності. Надалі в цьому підручнику для стислості використовуватиметься назва «закон Вейбулла».

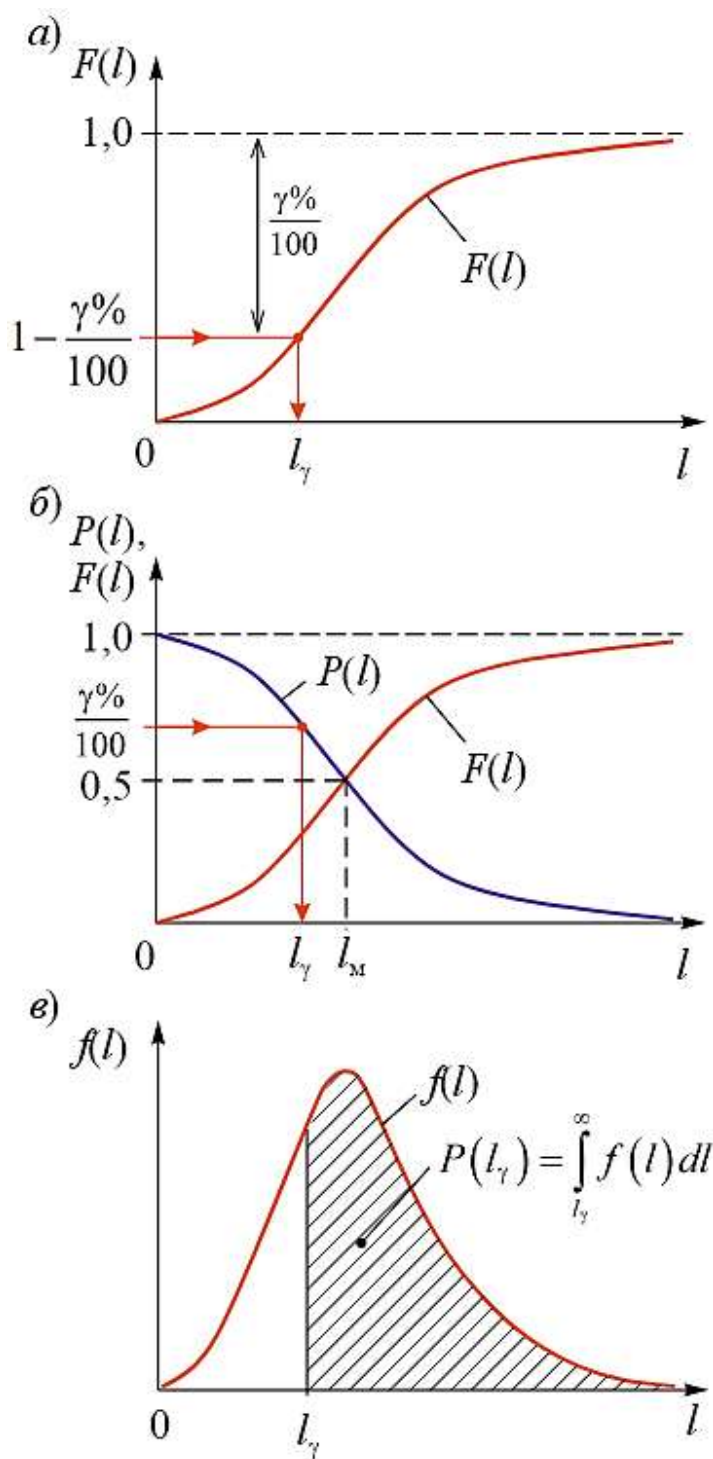


Рис. 5.7. Визначення гамма-відсоткового значення випадкової величини з використанням функцій:
а) інтегральної $F(l)$; б) надійності $P(l)$;
в) диференціальної $f(l)$

За значенням гамма-відсоткового наробітку до відмови судять про більшу чи меншу безвідмовність об'єктів. Для показників безвідмовності зазвичай задають значення 90; 95; 99; 99 % тощо.

Для критичних відмов задані значення γ мають бути дуже близькими до 100 %, щоб зробити критичні відмови практично неможливими подіями.

Графічна схема визначення гамма-відсоткового значення наробітку до відмови за допомогою кривих інтегральної функції, функції надійності та диференціальної функції показано на рис. 5.7.

Як впливає з наведеної схеми, для отримання необхідного рівня безвідмовної роботи об'єкта необхідно:

— задатися допустимим значенням

$$P(l_\gamma) = \gamma\%/100 = \gamma,$$

тобто гамма-відсотком об'єктів (у частках

одиниці), які пропрацюють без відмови за гамма-відсотковий наробіток;

– визначити напрацювання об'єкта $l = l_\gamma$, відповідне даній регламентованій імовірності безвідмовної роботи.

Гамма-відсоткові показники – це показники, яким задовольняють не задовольняють не менше γ відсотків виробів. Наприклад, запис $l_{\gamma=0,95} = 1$ млн км пробігу означає, що при наробітку, що дорівнює 1 млн км пробігу, імовірність безвідмовної роботи становитиме 0,95. Або, інакше, – не менше 95 % виробів (локомотивів, вагонів у дослідної партії) матимуть наробіток до відмови понад 1 млн км пробігу.

За наведеними формулами визначають й інші гамма-відсоткові показники: «гамма-відсотковий ресурс», «гамма-відсотковий строк служби», «гамма-відсотковий час відновлення», «гамма-відсотковий термін збереженості».

Статистичні оцінки для гамма-відсоткових показників можуть бути отримані на основі статистичних оцінок параметрів у разі, якщо закон розподілу відомий або безпосередньо після апроксимації емпіричних функцій відповідними теоретичними розподілами.

5.1.5. Середній наробіток до відмови¹

Середній наробіток до відмови це математичне сподівання напрацювання об'єкта до *першої* відмови.

За визначенням математичне сподівання виражається як:

$$L_c = \int_0^{\infty} l f(l) dl, \quad (5.15)$$

де L_c – середній наробіток до відмови.

¹ Цей показник використовується як для невідновлюваних, так і для відновлюваних об'єктів. Для невідновлюваних об'єктів цей показник одночасно характеризує і їхню довговічність.

Середній наробіток до відмови може використовуватися для попереднього визначення термінів ремонту або заміни елемента.

Середній наробіток до відмови позначається зазвичай через L_c , якщо наробіток вимірюється у км пробігу та через T_c , якщо наробіток вимірюється у годинах.

Фізично L_c є центром, навколо якого групуються значення випадкової величини наробітку об'єкта до першої відмови.

Перетворимо вираз (5.15), підставивши в нього вираз (5.8)

$$L_c = \int_0^{\infty} l \left(-\frac{dP(l)}{dl} \right) dl = - \int_0^{\infty} l dP(l). \quad (5.16)$$

Проінтегруємо вираз (5.16) частинами

$$\int u dv = uv - \int v du. \quad (5.17)$$

Тут

$$u = l, \quad du = dl, \quad dv = dP(l), \quad v = P(l).$$

Застосовуючи ці вирази до (5.16), отримуємо

$$L_c = - \left(lP(l) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} P(l) dl \right) = -lP(l) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(l) dl.$$

Оскільки при $l \rightarrow \infty$ добуток $lP(l) \rightarrow 0$, оскільки $P(l)$ набуває нульового значення при скінченному значенні l . При $l \rightarrow 0$ добуток $lP(l)$ також прямує до нуля, оскільки $P(0)=1$. Тобто добуток $lP(l)$ дорівнює нулю при підстановці як верхньої, так і нижньої меж інтегрування. Отже

$$L_c = \int_0^{\infty} P(l) dl. \quad (5.18)$$

Звідси випливає, що середнє напрацювання до відмови чисельно дорівнює площі, обмеженій графіком функції $P(l)$. Це співвідношення зручно використовувати для обчислення середнього напрацювання до відмови, особливо при розрахунках, що не потребують високої точності.

Наприклад, нехай відомі графіки $P_1(l)$ і $P_2(l)$ двох однойменних об'єктів, що наведені на рис. 5.8. Без проведення розрахунків можна зробити висновок, що другий елемент виходить з ладу приблизно в два рази рідше, ніж перший, оскільки площа $L_1'' \approx 2L_1'$.

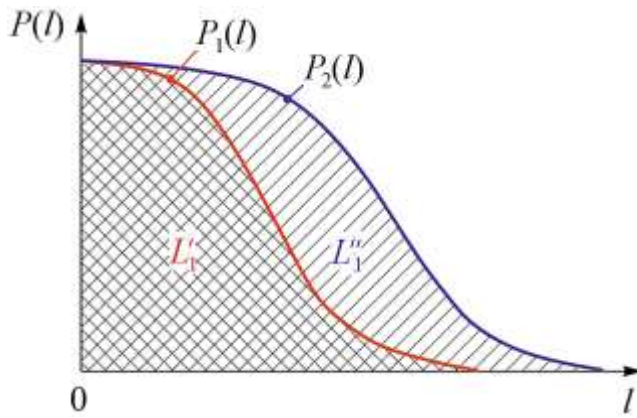


Рис. 5.8. Графічна інтерпретація середнього наробітку до відмови

Середній наробіток до відмови показує лише центр, навколо якого групуються значення випадкової величини. Ступінь розкиду, відхилення випадкової величини від центру характеризує дисперсія, яка є математичним сподіванням квадрата відхилення випадкової величини від її математичного сподівання:

$$D_l = \int_0^{\infty} (l - L_1)^2 f(l) dl. \quad (5.19)$$

При практичному використанні дисперсія незручна тим, що має розмірність квадрата випадкової величини. Наприклад, якщо наробіток до відмови має розмірність млн км, то розмірність дисперсії – млн км², якщо наробіток вимірюється в годинах, то розмірність дисперсії – год² і т. д.

Для усунення цього недоліку з дисперсії витягується квадратний корінь, і цей показник називається середнім квадратичним відхиленням (СКВ)

$$\sigma_l = \sqrt{D_l}. \quad (5.20)$$

Ще одним показником розкиду випадкової величини є коефіцієнт варіації, який представляє собою відношення СКВ до математичного сподівання випадкової величини

$$V_l = \frac{\sigma_l}{L}. \quad (5.21)$$

Числові характеристики (параметри) більшості розподілів випадкових величин, що застосовуються на практиці, можуть бути виражені через математичне сподівання та дисперсію (або СКВ) випадкової величини.

Вирази (5.15 – 5.21) встановлюють співвідношення між імовірнісними величинами. На практиці за результатами спостережень або випробувань обчислюють їх статистичні аналоги – статистичні оцінки.

Статистична оцінка середнього наробітку до відмови – це середнє значення наробітку елемента або системи до відмови, розраховане за вибіркою експериментальних даних. Визначається:

– для невеликої кількості випробовуваних об’єктів за наявності інформації про моменти виходу з ладу всіх випробовуваних об’єктів

$$L_c^c = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{N}; \quad (5.22)$$

– для великої кількості випробовуваних об’єктів за наявності інформації про кількість об’єктів, що вийшли з ладу, у кожному j -му інтервалі наробітку

$$L_c^c = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \bar{l}_j}{N}, \quad (5.23)$$

де l_i – наробіток i -го елемента (системи, технічного об’єкта) до першої відмови;

N – кількість працездатних об’єктів на початку випробування (при $l = 0$);

k – кількість інтервалів статистичного ряду;

n_j – кількість об’єктів, що відмовили в j -му інтервалі;

$\bar{l}_j$ – середнє значення наробітку в j -му інтервалі.

Використання формули (5.22) передбачає наявність інформації про моменти виходу з ладу всіх випробовуваних об’єктів. Тому за великого числа об’єктів N користуватися зазначеною формулою для обчислення L_c^c незручно. Маючи дані про кількість об’єктів, що вийшли з ладу у кожному інтервалі часу середній наробіток до відмови краще визначати за формулою (5.23). Також необхідно відмітити, що формули (5.22) та (5.23) відповідають плану випробувань, за якого всі об’єкти мають бути випробовуються до їхньої відмови.

Наробіток до відмови, як правило, має значний статистичний розкид, зумовлений статистичним розкидом механічних властивостей матеріалів, елементів і з'єднань, а також мінливістю (у часі та в просторі) параметрів, що характеризують зовнішні навантаження та впливи.

Приклад 5.2. У процесі експлуатації рухомого складу ураховува-лося кількість однойменних об'єктів, що виходять з ладу, протягом ко-жної тисячі кілометрів пробігу. Спостереження велося за 1000 одноти-пних об'єктів ($N=1000$). У результаті підрахунку об'єктів, що відмо-вили, отримано дані, зведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Кількість відмов об'єктів в j -му інтервалі наробітку

Інтервал наробітку Δl_j , км	Кількість відмов, n_j	Інтервал наробітку Δl_j , км	Кількість відмов, n_j
0–1000	40	7000–8000	72
1000–2000	48	8000–9000	72
2000–3000	72	9000–10000	73
3000–4000	64	10000–11000	84
4000–5000	68	11000–12000	72
5000–6000	67	12000–13000	104
6000–7000	74	13000–14000	90

Визначити середній наробіток до відмови розглянутих об'єктів.

Розв'язання. Для визначення L_c^c скористаємося формулою (5.22)

$$L_c^c = \frac{40 \cdot 500 + 48 \cdot 1500 + 72 \cdot 2500 + \dots + 90 \cdot 13500}{1000} = 7722 \text{ км.}$$

Приклад 5.3. За результатами випробувань 12 об'єктів встановлено наробіток кожного з них до першої відмови: $l_1 = 765$ км, $l_2 = 1350$ км, $l_3 = 1350$ км, $l_4 = 2500$ км, $l_5 = 3120$ км, $l_6 = 3120$ км, $l_7 = 2500$ км, $l_8 = 2900$ км, $l_9 = 4400$ км, $l_{10} = 2500$ км, $l_{11} = 4400$ км, $l_{12} = 4600$ км.

Розв'язання. Скориставшись формулою (4.12), отримаємо

$$L_c^c = \frac{765 + 1350 \cdot 2 + 2500 \cdot 3 + 3120 \cdot 2 + 2900 + 4400 \cdot 2 + 4600}{12} \approx 2792 \text{ км.}$$

5.1.6. Інтенсивність відмов

Відповідно до [2], *інтенсивність відмов* – це умовна густина імовірності виникнення відмови об’єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла.

Розглянемо об’єкт, що працював безвідмовно протягом наробітку l . Необхідно визначити імовірність того, що він продовжить працювати безвідмовно ще протягом деякого інтервалу напрацювання Δl , рис. 5.9.

Позначимо $P[0; l] = P(l)$ – імовірність безвідмовної роботи в інтервалі $[0, l]$, $P[0, l + \Delta l] = P(l + \Delta l)$ – імовірність безвідмовної роботи в інтервалі $[0, l + \Delta l]$.

Розглядуваний об’єкт пропрацює безвідмовно в інтервалі $[0, l + \Delta l]$, якщо він пропрацює безвідмовно в інтервалі $[0, l]$ та в інтервалі $[l, l + \Delta l]$.

За теоремою множення імовірностей

$$P(l + \Delta l) = P(l) \cdot P[l, l + \Delta l].$$

Виразимо звідси імовірність безвідмовної роботи в інтервалі $[l, l + \Delta l]$

$$P[l, l + \Delta l] = \frac{P(l + \Delta l)}{P(l)}.$$

Імовірність відмови в інтервалі $[l, l + \Delta l]$

$$Q[l, l + \Delta l] = 1 - P[l, l + \Delta l] = 1 - \frac{P(l + \Delta l)}{P(l)} =$$

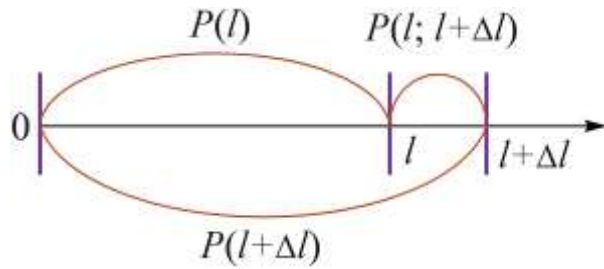


Рис. 5.9. Діаграма напрацювання

$$= \frac{P(l) - P(l + \Delta l)}{P(l)} = - \frac{P(l + \Delta l) - P(l)}{P(l)}.$$

Помножимо чисельник і знаменник дробу на Δl

$$Q[l, l + \Delta l] = - \frac{P(l + \Delta l) - P(l)}{P(l)} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta l} = - \frac{P(l + \Delta l) - P(l)}{\Delta l} \cdot \frac{\Delta l}{P(l)}.$$

Перейдемо до границі при $\Delta l \rightarrow 0$. Враховуючи, що:

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{P(l + \Delta l) - P(l)}{\Delta l} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{dP(l)}{\Delta l} = P'(l),$$

отримуємо, що для достатньо малого інтервалу Δl

$$Q[l, l + \Delta l] \cong - \frac{P'(l)}{P(l)} \Delta l.$$

Введемо позначення

$$\lambda(l) = - \frac{P'(l)}{P(l)}. \quad (5.24)$$

Тоді

$$Q[l, l + \Delta l] \cong \lambda(l) \Delta l. \quad (5.25)$$

Величина $\lambda(l)$ за визначенням дорівнює відношенню похідної імовірності безвідмовної роботи до самої цієї імовірності, взятому з протилежним знаком.

З виразу (5.25) випливає, що імовірність відмови в інтервалі $[l, l + \Delta l]$ при достатньо малій величині Δl пропорційна ширині інтервалу Δl , при цьому коефіцієнтом пропорційності є інтенсивність відмов $\lambda(l)$.

Звідси імовірність безвідмовної роботи

$$P[l, l + \Delta l] \cong 1 - \lambda(l) \Delta l. \quad (5.26)$$

Необхідно ще раз підкреслити, що співвідношення (5.25) та (5.26) справедливі тільки для малих значень ширини інтервалу Δl .

Використовуючи (5.8) та (5.24), можна записати

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{P(l)}. \quad (5.27)$$

Таким чином:

– інтенсивність відмов зростає в міру зменшення імовірності безвідмовної роботи, що має місце в разі збільшення наробітку l ;

– за $P(l) \approx 1$ (для високонадійних систем) інтенсивність відмов приблизно дорівнює функції густини розподілу наробітку до відмови, тобто

$$\lambda(l) = f(l)/1 = f(l).$$

Статистична оцінка інтенсивності відмов. З рівняння (5.24) випливає

$$\lambda^c(l) = -\frac{P'^c(l)}{P^c(l)}. \quad (5.28)$$

Статистична оцінка похідної від імовірності безвідмовної роботи

$$P'^c(l) = \frac{P^c(l + \Delta l) - P^c(l)}{\Delta l}. \quad (5.29)$$

Статистична оцінка імовірності безвідмовної роботи

$$P^c(l) = \frac{N(l)}{N}, \quad P^c(l + \Delta l) = \frac{N(l + \Delta l)}{N}, \quad (5.30)$$

де $N(l)$, $N(l + \Delta l)$ – кількість об'єктів, що пропрацювали безвідмовно до напруження l і Δl відповідно;

N – загальна кількість спостережуваних об'єктів (обсяг вибірки).

Підставимо (5.30) в (5.29), отримаємо

$$P'^c(l) = \frac{\frac{N(l+\Delta l)}{N} - \frac{N(l)}{N}}{\Delta l} = \frac{N(l+\Delta l) - N(l)}{N\Delta l}. \quad (5.31)$$

Підставляючи оцінку похідної $P'^c(l)$ (5.31) та оцінку імовірності безвідмовної роботи $P^c(l)$ (5.30) в (5.28), отримаємо оцінку інтенсивності відмов

$$\lambda^c(l) = -\frac{N(l+\Delta l) - N(l)}{N\Delta l} \bigg/ \frac{N(l)}{N} = -\frac{N(l+\Delta l) - N(l)}{N(l)\Delta l}.$$

Переставляючи доданки чисельника, отримуємо

$$\lambda^c(l) = \frac{N(l) - N(l+\Delta l)}{N(l)\Delta l}.$$

З фізичного змісту різниця $N(l) - N(l+\Delta l)$ представляє собою кількість відмов Δn в інтервалі $[l, l+\Delta l]$, звідси

$$\lambda^c(l) = \frac{\Delta n}{N(l)\Delta l}. \quad (5.32)$$

Тут $\Delta n/\Delta l$ – це кількість відмов, що припадає на одиницю наробітку.

Таким чином, інтенсивність відмов статистично являє собою кількість відмов, що припадає на одиницю наробітку, віднесена до числа об'єктів, які зберегли працездатність за наробітком l .

Оскільки Δn і $N(l)$ – безрозмірні величини, то з (5.20) випливає, що розмірність інтенсивності відмов обернена розмірності наробітку. Наприклад, якщо наробіток вимірюється в годинах, то розмірність інтенсивності відмов буде год^{-1} , а якщо наробіток вимірюється в кілометрах, то в км^{-1} .

При виборі величини Δl варто керуватися тривалістю періоду спостережень і діючої для оцінюваного об'єкта періодичністю ТО і ПР. Найбільш часто для одиниць рухомого складу Δl приймають рівним напрацюванням між ТО-3, або пробігам, $2 \cdot 10^3$ км, $3 \cdot 10^3$ км.

При визначенні інтенсивності відмов за статистичними даними в експлуатації, функція $N(l)$ має дискретний характер, тобто відомі лише значення кількості працездатних об'єктів на початку – N_{i-1} (N_{Π}) та наприкінці – N_i (N_{κ}) інтервалу Δl , рис. 5.10. Тому замість $N(l)$ використовують $N_{\text{сеп}}$ – середню кількість працездатних об'єктів у інтервалі Δl . Для i -го інтервалу напрацювання Δl_i кількість працездатних об'єктів у середині інтервалу визначається за формулою:

$$N_{\text{сеп}} = \frac{N_{i-1} + N_i}{2} = \frac{N_{\Pi} + N_{\kappa}}{2}.$$

Тоді

$$\lambda^c(l) = \frac{\Delta n}{N_{\text{сеп}} \Delta l}. \quad (5.33)$$

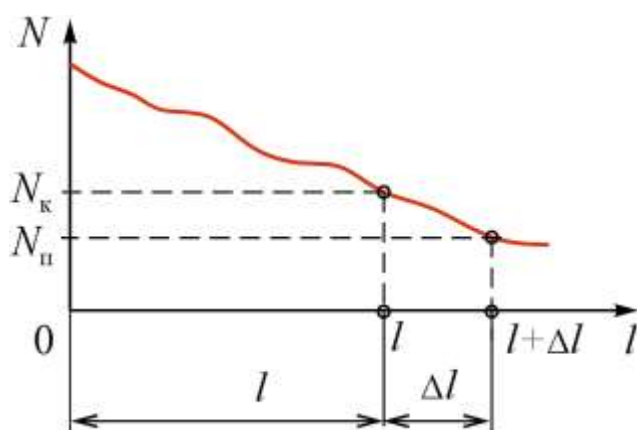


Рис. 5.10. До визначення статистичної оцінки інтенсивності відмов

Таким чином інтенсивність відмов – це відношення числа об'єктів, що відмовили в одиницю наробітку, до середнього числа об'єктів, що справно працюють у даному інтервалі наробітку. Або інакше імовірність виникнення відмови в інтервалі наробітку Δl , віднесена до величини інтервалу наробітку, тобто густина імовірності виникнення відмови. Фізичний зміст густини імовірності виникнення відмови – це імовірність відмови за одиницю наробітку

(швидкість появи відмови об'єкта).

Інтенсивність відмов $\lambda(l)$ є функцією наробітку l . Вона залежить від того значення l , після якого оцінюється $\lambda(l)$. Тому застосування $\lambda(l)$ без зазначення моменту l не має сенсу.

Приклад 5.4. Розглянемо схему випробувань п'яти однотипних невідновлюваних об'єктів. Будемо фіксувати кількість об'єктів, що від-

мовили, протягом кожної тисячі кілометрів наробітку ($\Delta l = 1000$ км). Тривалість випробування – до відмови всіх об'єктів. Схему процесу випробувань наведено на рис. 5.11. На схемі l_i – наробіток i -го об'єкта до першої відмови.

Визначити інтенсивність відмов об'єктів для інтервалу напрацювання 1000...2000 км.

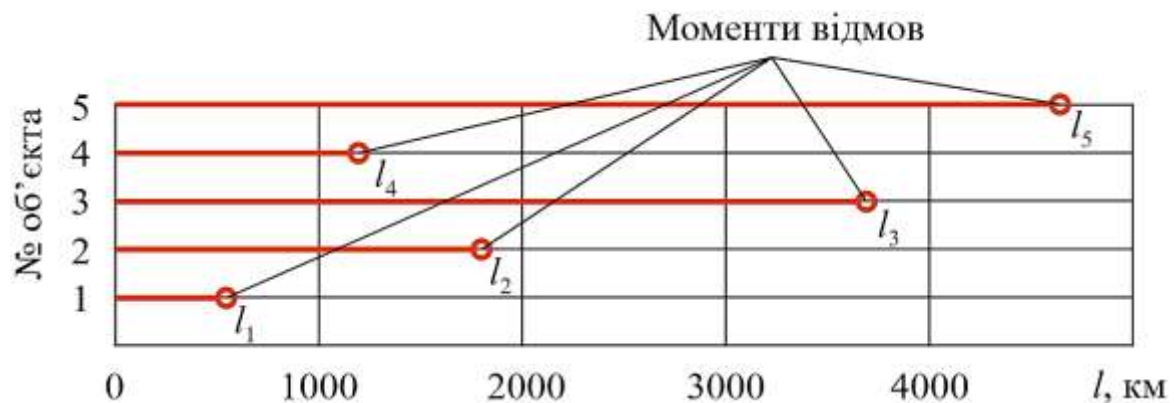


Рис. 5.11. Схему процесу випробувань п'яти невідновлюваних об'єктів

Розв'язання. Як впливає зі схеми випробувань, в інтервалі наробітку 1000...2000 км кількість об'єктів, що відмовили, $\Delta n = 2$; кількість об'єктів, що справно працюють на початку і наприкінці інтервалу, – $N_{\Pi} = 4$, $N_{\kappa} = 2$.

Тоді:

– середня кількість об'єктів, що справно працюють у розглянутому інтервалі,

$$N_{\text{сеп}} = \frac{4 + 2}{2} = 3;$$

– статистична оцінка інтенсивності відмов в інтервалі напрацювання 1000...2000 км

$$\lambda^c(1000) = \frac{2}{3 \cdot 1000} = 6,67 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}.$$

Переваги показника $\lambda(l)$. Інтенсивність відмов як кількісна характеристика має низку переваг:

– вона, будучи функцією наробітку, дає змогу наочно встановити характерні періоди роботи об’єктів, що може бути використано для підвищення їх надійності;

– за відомою характеристикою $\lambda(l)$ досить просто визначити інші кількісні характеристики надійності:

– імовірність безвідмовної роботи за наробіток l

$$P(l) = \exp \left[- \int_0^l \lambda(l) dl \right]; \quad (5.34)^1$$

– середній наробіток до відмови

$$L_1 = \int_0^{\infty} P(l) dl = \int_0^{\infty} \exp \left[- \int_0^l \lambda(l) dl \right] dl; \quad (5.35)$$

– імовірність події, що полягає в тому, що об’єкт, який пропрацював безвідмовно до моменту l , відмовить за невеликий проміжок наробітку Δl , що примикає до наробітку l

$$P[(l < L \leq l + \Delta l) / L > l] \approx \lambda(l) \cdot \Delta l; \quad (5.36)$$

– кількість об’єктів, що відмовили, Δn у проміжку наробітку Δl і тим самим визначити необхідну кількість запасних частин $n_{зч}$, що особливо важливо для забезпечення нормальної експлуатації технічних об’єктів

$$n_{зч} \geq \Delta n = \lambda^c(l) \cdot N_{сер} \cdot \Delta l. \quad (5.37)$$

5.1.7. λ -характеристика життєвого циклу об’єкта

Якщо під час статистичної оцінки надійності технічних об’єктів наробіток розбити на досить велику кількість однакових інтервалів Δl за тривалий термін, то результатом обробки статистичних (дослідних) даних буде графік λ -характеристики життєвого циклу об’єкта.

¹ Зазначимо, що вираз (5.34) називається «основне рівняння надійності для невідновлюваних виробів».

Побудова емпіричної залежності $\lambda^c(l)$ проводиться наступним чином. Під спостереження (на випробування) потрапляє N однойменних об'єктів, які експлуатуються (випробовуються) протягом наробітку l . Весь інтервал напрацювання розбивається на низку інтервалів групування шириною Δl , і в кожному такому інтервалі фіксують кількість об'єктів, що відмовили, Δn . Об'єкт, що відмовив, вилючають з експлуатації (припиняють його випробування). Таким чином, кількість спостережуваних об'єктів поступово зменшується. Спостереження (випробування) тривають до відмови останнього об'єкта або протягом заздалегідь заданого наробітку.

Результати дослідів зручно оформлювати у вигляді табл. 5.2.

У табл. 5.2 у першому інтервалі $[0, \Delta l]$ відмовило Δn_1 об'єктів, у другому – $[\Delta l, 2\Delta l]$ – Δn_2 і т.д.

Таблиця 5.2

Результати дослідів

№ п/п	Інтервал наробітку, км		Кількість відмов в інтервалі
	початок	кінець	
1	0	Δl	Δn_1
2	Δl	$2\Delta l$	Δn_2
3	$2\Delta l$	$3\Delta l$	Δn_3
.			
.			
.			

Далі розраховується статистична оцінка інтенсивності відмов для кожного інтервалу за формулами:

$$\lambda^c(0) = \frac{\Delta n_1}{N_{\text{сер}1}\Delta l}; \quad \lambda^c(\Delta l) = \frac{\Delta n_2}{N_{\text{сер}2}\Delta l}; \quad \lambda^c(2\Delta l) = \frac{\Delta n_3}{N_{\text{сер}3}\Delta l};$$

і так далі. Тут як аргумент функції $\lambda^c(l)$ виступає початок інтервалу. Отримане значення інтенсивності відмов вважають постійним у даному інтервалі Δl_i .

Результати розрахунків оформляються графічно у вигляді діаграми інтенсивності відмов.

Для побудови діаграми горизонтальна вісь наробітку розбивається на інтервали шириною Δl , і на кожному з них будують прямокутник, висота якого дорівнює інтенсивності відмов у даному інтервалі, рис. 5.12. Тут ступінчаста лінія $\lambda^c(l)$ являє собою емпіричну залежність інтенсивності відмов від наробітку.

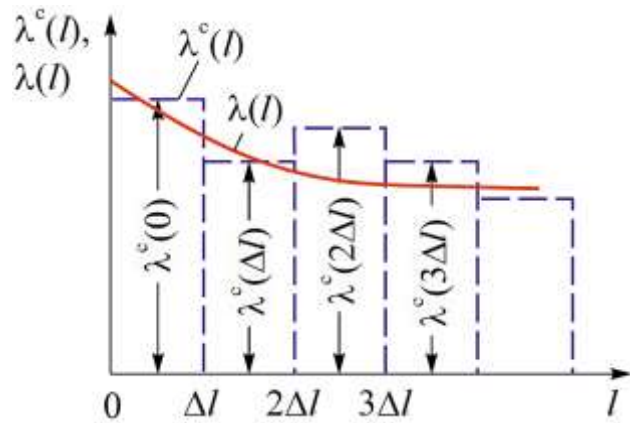


Рис. 5.12. Діаграма інтенсивності відмов

За необмеженого збільшення кількості випробовуваних об'єктів, тобто за $N \rightarrow \infty$ ширина інтервалу групування $\Delta l \rightarrow 0$ і ступінчаста лінія перетворюється на гладку криву $\lambda(l)$, яка являє собою теоретичну залежність інтенсивності відмов від наробітку $\lambda^c(l) \rightarrow \lambda(l)$.

$$\begin{matrix} N \rightarrow \infty \\ \Delta l \rightarrow 0 \end{matrix}$$

Для різних об'єктів і різних умов експлуатації можуть бути отримані абсолютно різні залежності $\lambda(l)$, але типовий, тобто такий, що найчастіше спостерігається, вигляд кривої $\lambda(l)$ показано на рис. 5.13, що і називається λ -характеристикою життєвого циклу об'єкта.

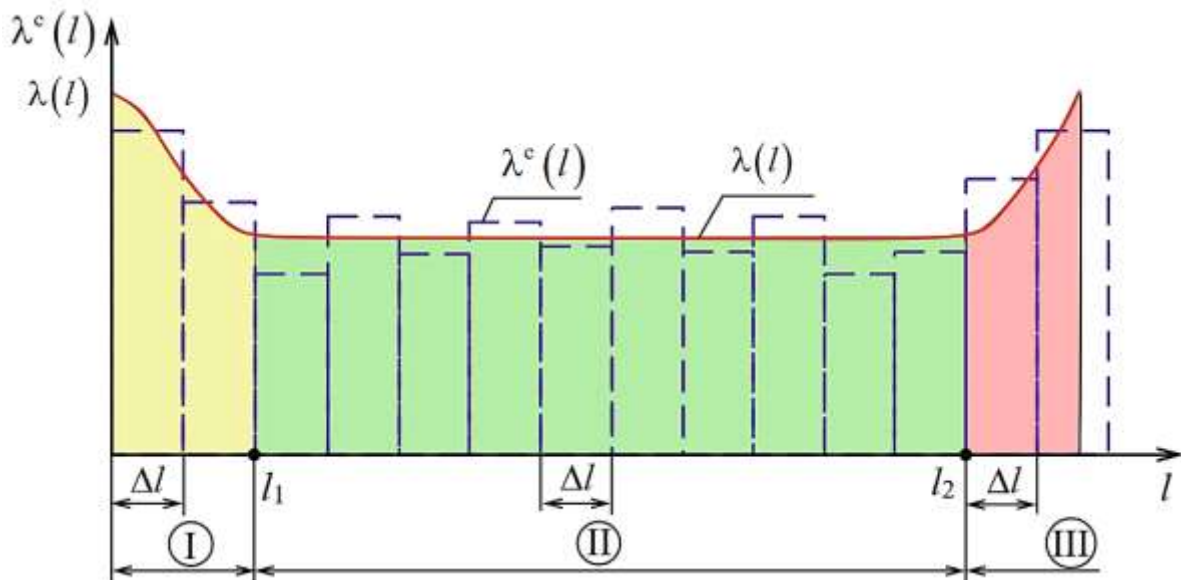


Рис. 5.13. Типовий вигляд λ -характеристики життєвого циклу об'єкта

На λ -характеристиці чітко помітні три різні періоди напрацювання:

- *I період* – період припрацювання (приробітку), протягом якого відмовляють у здебільшого ті об'єкти, які мали приховані дефекти виготовлення. Поступово дефектні об'єкти вибраковуються, сполучені деталі притираються (припрацьовуються) одна до одної, кількість відмов зменшується, і крива $\lambda(l)$ має спадний вигляд. Величина цього інтервалу залежить від рівня організації відбраковування елементів на заводі-виготовлювачі. Значення інтенсивності відмов $\lambda(l)$ на цьому інтервалі в основному залежить від якості складання об'єктів, дотримання вимог монтажу, точністю регулювання і т.д. Для рухомого складу по пробігу цей період триває звичайно до першого ТО-3. Як правило – це етап гарантійного обслуговування. У наукових колах обговорюється можливість виключення цього етапу за рахунок підвищення якості виробництва, але в результаті зростає вартість виробу. У світовій практиці виключення приробіткового етапу і, як наслідок, гарантійного періоду немає;

- *II період* – період нормальної експлуатації, в якому інтенсивність відмов майже постійна величина. Причинами відмов у цьому інтервалі є:

- конструкційні недоліки. Наприклад, буксові повідки встановлювали з підвищеним натягом під час монтажу буксового вузла. Під час проходження нерівностей колії з підвищеною швидкістю динамічні напруги в повідках могли перевищити межу міцності металу, і відбувався обрив повідків. Конструкційні зміни буксового вузла повністю би виключили цей вид відмов;
- помилки обслуговуючого персоналу. Наприклад, якщо машиніст занадто швидко набирає позиції під час пуску локомотива, не чекаючи, доки струм тягових двигунів знизиться до мінімальної величини, сила тяги локомотива може вийти за межі обмеження по зчепленню, виникає боксування колісних пар і, як наслідок, круговий вогонь по колектору з перекиданням електричної дуги на корпус тягового двигуна;
- несприятливі впливи зовнішнього середовища. Наприклад, під час проходження маслянистої плями, що залишилася на рейках після вихлюпування нафтопродуктів із цистерни попереду поїзда, що йде попереду, різко зменшується коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою, виникає боксування, круговий вогонь і перекидання дуги на корпус тягового двигуна.

Оскільки частота прояву кожної із зазначених причин розподілена в часі приблизно рівномірно, інтенсивність відмов у періоді нормальної експлуатації є постійною величиною.

Сталість $\lambda(l)$ у цей період обумовлюється результатами дії планово-попереджувальної системи ремонту (відповідності її параметрів ступеню експлуатаційного завантаження рухомого складу). Величина $\lambda(l)$ в цей період в основному обумовлена тільки якістю проектування, стабільністю характеристик застосованих матеріалів, відповідністю передбачуваних умов експлуатації фактичним, і головне, якістю і дієвістю профілактичних робіт, що передбачається системою планово-попереджувальних ремонтів;

– *III період* – період старіння або посиленого зносу. В цьому інтервалі знос поверхонь, що труться, досягає гранично допустимої величини, виникає люфт, биття сполучених деталей, зростає динамічна напруга і зростає кількість ушкоджень механічного устаткування; внаслідок старіння ізоляції зростає кількість її пробоїв, тобто кількість та інтенсивність відмов зростають зі збільшенням напруження.

З метою зменшення загальної кількості відмов проводять обкатку локомотивів після їх виготовлення або ремонту – «відсікають» припрацьовочний період. Проводять своєчасну заміну або ремонт зношених деталей – «відсікають» період посиленого зносу. Кількість відмов у періоді нормальної експлуатації може бути зменшене шляхом проведення конструкційної або технологічної модернізації під час виготовлення або ремонту обладнання та підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу.

5.2. Показники безвідмовності відновлюваних об'єктів

Відновлюваний об'єкт відрізняється від невідновлюваного тільки специфікою експлуатації. Процес експлуатації об'єктів з відновленням можна представити як послідовність інтервалів працездатності, що чергуються з інтервалами відновлення. При цьому відновлення може бути як повне (наприклад, заміна на новий ідентичний зразок), так і часткове (ремонт його несправної частини). При повному відновленні напруження між відмовами мають однаковий розподіл. При частко-

вому відновленні напрацювання між наступними відмовами об'єкта мають різні розподіли.

5.2.1. Середній наробіток на відмову

Відповідно до [2], *середній наробіток на відмову* – це відношення сумарного наробітку відновлюваного об'єкта до математичного сподівання числа його відмов протягом цього наробітку. Цей показник використовується для характеристики безвідмовності рухомого складу і ремонтіваних складових частин з урахуванням як перших, так і наступних відмов.

Імовірнісна оцінка середнього наробітку на відмову

$$L_{\text{сер}} = \frac{l}{M[r(l)]}, \quad (5.38)$$

де l – сумарний наробіток;
 $r(l)$ – кількість відмов, що відбулися протягом сумарного наробітку l ;
 $M[r(l)]$ – математичне сподівання кількості відмов, що настали протягом сумарного наробітку l .

Статистична оцінка середнього наробітку на відмову визначається як відношення сумарного наробітку за час спостереження за об'єктом або групою однотипних об'єктів до спостережуваного числа відмов за цей самий час, тобто це середній наробіток виробу або системи між двома послідовними відмовами:

– для порівняно невеликого числа випробовуваних об'єктів

$$L_{\text{сер}}^c = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} = \frac{l_{\text{сум}}}{n}; \quad (5.39)$$

– для великої кількості випробовуваних об'єктів

$$L_{\text{сер}}^c = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} l_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j} = \frac{\sum_{j=1}^N l_j^{\text{сум}}}{\sum_{j=1}^N n_j^{\text{сум}}}, \quad (5.40)$$

де l_i – наробіток (пробіг або час справної роботи) об'єкта між $(i-1)$ та i -тою відмовами;

l_{ij} – наробіток (пробіг або час справної роботи) j -го зразка об'єкта між $(i-1)$ та i -тою відмовами;

n_j – кількість відмов за наробіток l j -го зразка;

$l_{\text{сум}}$ – сумарний наробіток об'єкта за період спостереження;

n – кількість відмов за період спостереження l ;

$l_j^{\text{сум}}$ – сумарний наробіток j -го об'єкта за період спостереження;

$n_j^{\text{сум}}$ – кількість відмов j -го об'єкта за період спостереження.

Приклад 5.5. За час спостереження за роботою одного об'єкта було зафіксовано 11 відмов, а сумарне напрацювання об'єкта становило 7,86 млн. км пробігу.

Визначити середній наробіток на відмову.

Розв'язання. За формулою (4.39) знаходимо

$$L_{\text{сер}}^c = \frac{7,86}{11} = 0,715 \text{ млн. км.}$$

Приклад 5.6. Протягом деякого періоду часу здійснювалося спостереження за роботою трьох однотипних об'єктів. За період спостереження було зареєстровано за першим об'єктом сім відмов, за другим і третім – десять та вісім відмов відповідно. Сумарне напрацювання першого об'єкта склало 1,92, другого – 4,18 та третього – 2,37 млн. км пробігу.

Потрібно визначити середній наробіток на відмову.

Розв'язання. Для визначення середнього наробітку на відмову скористаємося формулою (5.40):

$$L_{\text{сер}}^c = \frac{1,92 + 4,18 + 2,37}{7 + 10 + 8} = 0,34 \text{ млн. км.}$$

5.2.2. Параметр потоку відмов

Для одиниць рухомого складу і їхніх ремонтів складальних одиниць і деталей подібною інтенсивності відмов характеристикою безвідмовності є параметр потоку відмов $\omega(l)$, тобто густина імовірності виникнення відмови відновлюваного об'єкта, яка визначається для розглянутого моменту наробітку.

Відповідно до [2], *параметр потоку відмов* – це відношення математичного сподівання кількості відмов відновлюваного об'єкта за досить малий його наробіток до значення цього наробітку.

Модель експлуатації відновлюваних об'єктів можна описати так. Після деякого наробітку в кожного з об'єктів може статися відмова. Після відновлення працездатності об'єкт продовжить свою роботу. Моменти відмов сукупності однотипних об'єктів у таких умовах створюють деякий потік відмов. Найчастіше цей потік є ординарним, без післядії. У такому потоці зникаюче мала імовірність появи одночасно більш ніж однієї відмови, а імовірність появи відмови об'єкта не залежить від колишніх відмов. У якості кількісного показника потоку відмов використовують математичне сподівання числа відмов n об'єктів за напрацювання l

$$M[n(l)] = \int_0^{l_{\text{сум}}} \omega(l) dl, \quad (5.41)$$

де $\omega(l)$ – параметр потоку відмов, що характеризує інтенсивність цього потоку.

При віднесенні $M[n(l)]$ до сумарного наробітку, за який сталися ці відмови, виходить *середнє значення параметра потоку відмов*

$$\omega_{\text{сер}} = \frac{1}{l_{\text{сум}}} M[n(l)], \quad (5.42)$$

що кількісно оцінює середню інтенсивність відмов відновлюваних об'єктів. За фізичним змістом середній параметр потоку відмов $\omega_{\text{сер}}$ аналогічний застосовуваному в локомотивному господарстві питомій кількості псувань, несправностей, непланових ремонтів на 1 млн км пробігу.

Імовірнісна оцінка параметра потоку відмов

$$\omega(l) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{M[n(\Delta l)]}{\Delta l}, \quad (5.43)$$

де Δl – розглянутий (достатньо малий) інтервал наробітку;
 $n(\Delta l)$ – кількість відмов в інтервалі наробітку Δl (від l до $l + \Delta l$);
 $M[n(\Delta l)]$ – математичне сподівання кількості відмов об'єкта за достатньо малий наробіток Δl .

Статистична оцінка параметра потоків відмов

$$\omega^c(l) = \frac{\Delta n}{N \cdot \Delta l}, \quad (5.44)$$

де Δn – кількість відмов в інтервалі наробітку Δl ;
 N – кількість випробовуваних об'єктів. Оскільки всі об'єкти, що відмовили замінюються справними, то N – це початкова кількість випробовуваних об'єктів.

Згідно з формулою (5.44) параметр потоку відмов – це відношення кількості відмов за одиницю наробітку до числа випробовуваних об'єктів (за умови, що всі випробовувані об'єкти, що вийшли з ладу, замінюються справними (новими або відремонтованими)). За фізичним змістом параметр потоку відмов являє собою швидкість появи відмов (середнє кількість відмов за одиницю наробітку).

Порівнюючи формули (5.32) і (5.44) можна відзначити, що інтенсивність відмов повніше характеризує надійність об'єкта, тому що показує частоту відмов, віднесену до фактично працездатного числа об'єктів на момент певного наробітку.

Використовуючи формулу (5.44), можна визначити середню кількість відмов об'єктів у проміжку наробітку (інтервалі наробітку) Δl

$$\Delta n = \omega^c(l) \cdot N \cdot \Delta l. \quad (5.45)$$

В описаній вище схемі можна зафіксувати значення напрацювання до відмови кожного N об'єктів, тобто $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_N$, за наявності

таких статистичних даних можна визначити середню величину наробітку на відмову

$$L_{\text{сеп}}^c = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_i + \dots + l_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \quad (5.46)$$

і середнє значення параметра потоку відмов

$$\omega_{\text{сеп}}^c = \frac{1}{L_2^c}. \quad (5.47)$$

До недоліків показника $\omega(l)$ як характеристики надійності необхідно віднести складність визначення за відомою функцією $\omega(l)$ інших характеристик надійності, зокрема, основної з них – імовірності безвідмовної роботи.

Переваги показника $\omega(l)$. Показник $\omega(l)$ дає змогу:

- визначити кількість запасних частин (об'єктів), необхідну для забезпечення нормальної експлуатації технічних об'єктів у проміжку наробітку Δl , що примикає до наробітку l (див. формулу (5.45));
- спланувати частоту профілактичних заходів, структуру ремонтних підприємств, необхідну кількість і номенклатуру запасних частин.

Приклад 5.7. Розглянемо схему випробувань п'яти однотипних відновлюваних об'єктів ($N = 5$). Фіксуємо кількість відмов об'єктів протягом кожної тисячі кілометрів пробігу. Об'єкти, що відмовили, замінюються справними (новими або відремонтованими). Схему процесу випробувань наведено на рис. 5.14.

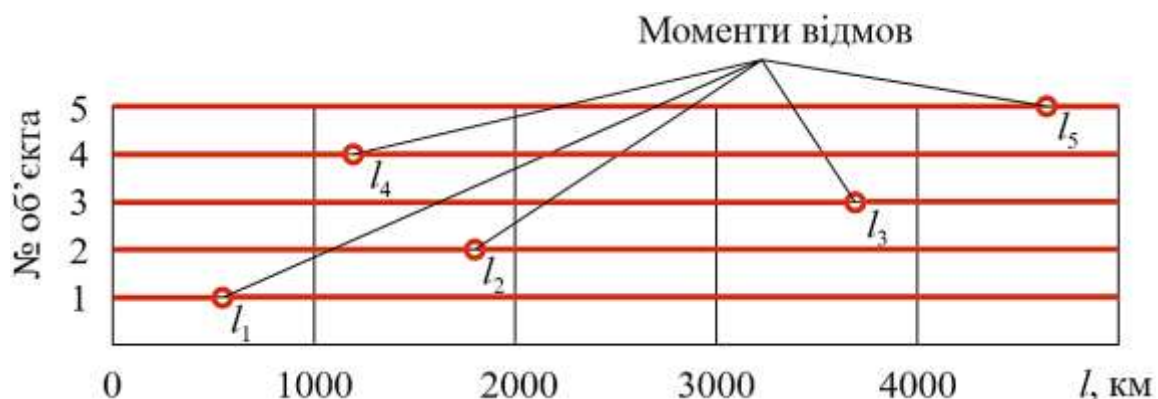


Рис. 5.14. Схему процесу випробувань п'яти відновлюваних об'єктів

Визначити параметр потоку відмов для інтервалу наробітку 1000...2000 км.

Розв'язання. Як впливає зі схеми випробувань, кількість відмов об'єктів в інтервалі наробітку 1000...2000 км – $\Delta n = 2$.

Тоді, статистична оцінка параметра потоку відмов у розглянутому інтервалі наробітку

$$\omega^c(1000) = \frac{2}{5 \cdot 1000} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}.$$

5.2.3. Найпростіший потік відмов

Відмови об'єктів виникають у випадкові моменти часу і протягом заданого періоду експлуатації спостерігається *потік відмов* (послідовність відмов, що відбуваються у випадкові моменти часу). Існує безліч математичних моделей потоків відмов. Найбільш часто при розв'язанні задач надійності використовують *найпростіший потік відмов* – пуассоновській потік, якій задовольняє одночасно трьома умовам: *стаціонарності, ординарності, відсутності післядії*.

Стаціонарність потоку відмов означає, що на будь-якому проміжку наробітку Δl_i імовірність виникнення n відмов залежить тільки від n і величини проміжку Δl_i , і не залежить від зсуву l по осі наробітку. Отже, статистичні характеристики відмов залишаються однаковими на будь-якому відрізку часу і можуть бути визначені по одній реалізації процесу, що полегшує постановку досліду по визначенню характеристик надійності. Таким чином, при

$$\Delta l_i = \Delta l_{i+1} = \dots = \Delta l_{i+m} \quad (5.48)$$

імовірність появи n відмов по всіх інтервалах складе

$$q_n(\Delta l_i) = q_n(\Delta l_{i+1}) = \dots = q_n(\Delta l_{i+m}). \quad (5.49)$$

Ординарність означає неможливість появи в той самий момент наробітку більш однієї відмови, тобто

$$\lim_{n \rightarrow 1} q_n(\Delta l) = 0 \text{ при } \Delta l \rightarrow 0. \quad (5.50)$$

Відсутність післядії означає, що імовірність настання n відмов в інтервалі наробітку не залежить від того, скільки було відмов і як вони розподілялися до цього інтервалу. Отже, факт відмови якого-небудь елемента в системі не приведе до зміни характеристик (працездатності) інших елементів системи, якщо навіть система і відмовила через якийсь елемент.

Досвід експлуатації складних технічних об'єктів показує, що відмови елементів відбуваються миттєво і якщо старіння елементів відсутнє, то потік відмов у системі можна вважати найпростішим.

Випадкові події, що утворюють найпростіший потік, розподілені за законом Пуассона

$$p_n(l) = \frac{(\lambda \cdot l)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda l} \quad \text{при } n \geq 0, \quad (5.51)$$

де $p_n(l)$ – імовірність виникнення протягом наробітку l рівно n подій (відмов);

λ – параметр розподілу (параметр потоку подій).

Якщо прийняти $n = 0$, то одержимо

$$P(l) = e^{-\lambda l} \quad (5.52)$$

– імовірність безвідмовної роботи об'єкта за наробіток l при інтенсивності відмов $\lambda = \text{const}$.

Також для найпростішого потоку відмов

$$\lambda^c = \omega^c = 1/L_{\text{сер}}. \quad (5.53)$$

Наслідком вищерозглянутих властивостей найпростішого потоку є те, що під час підсумовування великої кількості найпростіших потоків утворюється також найпростіший потік, якщо тільки серед них немає різко переважаючого. Завдяки цьому низку показників надійності складних технічних систем виявляється можливим визначити як суму аналогічних показників їхніх деталей і вузлів. Інша важлива властивість найпростішого потоку відмов призводить до того, що час роботи між двома сусідніми відмовами як деталей і вузлів, так і всього устат-

кування загалом, розподіляється за експоненційним законом розподілу, параметри якого легко розрахувати.

Експоненційний закон розподілу, зважаючи на свою простоту, відіграє в теорії надійності приблизно таку саму роль, що й закон Ома в електротехніці.

Переважає більшість електричних кіл нелінійні за своєю фізичною природою. Це настільки ускладнює їхній розрахунок, що робить його часто практично нездійсненним. Варто тільки ввести припущення про лінійний характер залежності струму від напруги для всіх елементів електричного кола (що й відображає закон Ома), як розрахунок цього кола різко спрощується.

Аналогічно в теорії надійності. Дуже часто закони розподілу наробітку до відмови та інших випадкових величин, що характеризують надійність технічних об'єктів, відрізняються від експоненційного, що робить практично нездійсненним аналітичний розрахунок надійності таких об'єктів. Введення припущення про експоненційність законів розподілу дає змогу отримати вирази основних показників надійності в аналітичній формі. Слід, однак, пам'ятати, що отримані в такий спосіб результати справедливі лише в першому наближенні й потребують подальшого уточнення з урахуванням реальних законів розподілу.

5.3. Взаємозв'язок між показниками безвідмовності

За умови, що заміна або відновлення обладнання, що відмовило відбувається миттєво, процес відмов можна представити у такому вигляді. Припустимо, що з N одиниць однотипного обладнання, працездатного в момент часу t , в інтервалі напрацювання Δt відмовило Δm одиниць, рис. 5.15.

Кількість одиниць обладнання, що відмовило, Δm складається з:

- Δm_1 – кількість одиниць обладнання, яке жодного разу не відмовило в інтервалі $[0, t]$, – так звані первинні відмови;
- Δm_2 – кількість одиниць обладнання, що відмовило в інтервалі $[0, t]$, відновленого і такого, що знову відмовило в інтервалі $[t, t + \Delta t]$

$$\Delta m = \Delta m_1 + \Delta m_2. \quad (5.54)$$

Загальна кількість відмов в інтервалі $[t, t+\Delta t]$ за формулою (5.44) знаходиться так:

$$\Delta m = N\omega(t)\Delta t, \quad (5.55)$$

де $\omega(t)$ – параметр потоку відмов.

Так як Δm_1 одиниць обладнання жодного разу не відмовили в інтервалі від 0 до t , то Δm_1 можна визначити через функцію густини розподілу наробітку між відмовами $f(t)$ як для невідновлюваного обладнання

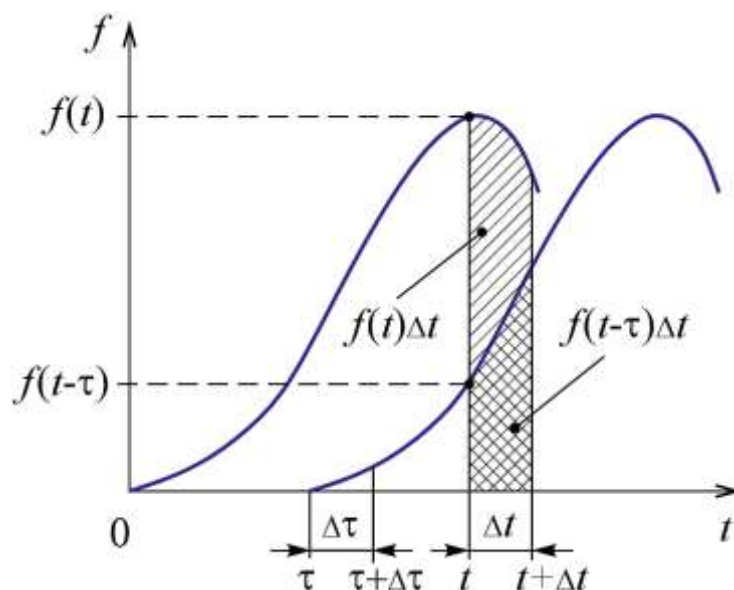


Рис. 5.15. До визначення імовірності відмов обладнання

$$\Delta m_1 = Nf(t)\Delta t. \quad (5.56)$$

Для визначення числа одиниць обладнання, що відмовило, Δm_2 оберемо такий інтервал $\Delta\tau$, протягом якого імовірність відмови кожного з Δm_2 об'єктів більш ніж один раз є величиною нескінченно малою порівняно з імовірністю одиночної відмови. Інтервал $[\tau, \tau + \Delta\tau]$ лежить усередині проміжку $[0, t]$ (див. рис. 5.15). Протягом цього інтервалу відмовило і замінено на нове (або повністю відновлено) $N\omega(\tau)\Delta\tau$ одиниць обладнання. З їх числа в інтервалі $[t, t+\Delta t]$ знову відмовлять, тобто матимуть повторну відмову ΔK одиниць. Ведучи врахування наробітку елементів, що відмовили в інтервалі $\Delta\tau$, від моменту τ , знаходимо імовірність їхньої повторної відмови в інтервалі Δt як $f(t-\tau)\Delta t$, тому $\Delta K = N\omega(\tau)\Delta\tau f(t-\tau)\Delta t$.

Підсумовуючи ΔK за всіма τ в інтервалі $[0; t]$, одержуємо, що з числа одиниць устаткування, які вже відмовили і були відновлені до моменту t , в інтервалі $[t, t+\Delta t]$ до повторної відмови піддається Δm_2 одиниць

$$\Delta m_2 = \sum_{0 < \tau < l} \Delta K(\tau) = N \Delta t \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau. \quad (5.57)$$

Підставивши у вираз (5.54) відповідні вирази для Δm , Δm_1 , Δm_2 , отримаємо

$$N \omega(t) \Delta t = N f(t) \Delta t + N \Delta t \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau. \quad (5.58)$$

Після ділення обох частин виразу (5.58) на $N \Delta t$ отримуємо інтегральне рівняння:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) f(t - \tau) d\tau. \quad (5.59)$$

Рівняння (5.59) не завжди вдається розв'язати аналітично. Якщо існують перетворення Лапласа $\omega(S)$ і $f(S)$, то в операторній формі параметр потоку відмов і функція густини розподілу наробітку між відмовами виражається так

$$\omega(S) = \frac{f(S)}{1 - f(S)}; \quad f(S) = \frac{\omega(S)}{1 + \omega(S)}, \quad (5.60)$$

$$\text{де } \omega(S) = \int_0^{\infty} \omega(t) e^{-St} dt, \quad f(S) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-St} dt.$$

Аналітичний розв'язок рівняння (5.59) існує для нормального розподілу напрацювання між відмовами та розподілу Ерланга. Для інших законів розподілу розв'язок рівняння (5.59) не записується в аналітичних виразах. Тому під час розв'язання практичних задач, в основі яких лежить опрацювання первинної статистичної інформації, рівняння (5.59) доцільно інтегрувати чисельними методами. При цьому як до, так і після виконання розрахунків функції $\omega(t)$ та $f(t)$ виявляються заданими у вигляді дискретного ряду $\omega(i)$ та $f(i)$. Зробимо заміну t на L , а τ на l . Уведемо позначення для підінтегральної функції

$$F(L, l) = \omega(l) f(L - l). \quad (5.61)$$

У дискретній формі, після заміни змінної L на n , а l на i вираз (5.61) записується у вигляді:

$$F(n, i) = \omega(i) f(n - i). \quad (5.62)$$

За $n = 0$ з рівняння (5.59) отримуємо $\omega_0 = f_0$.

Якщо $n = 1$, то, застосувавши чисельний метод інтегрування – метод трапецій, отримаємо, рис. 5.16, а):

$$\int_0^l \omega(l) f(L - l) dl = \frac{h(\omega_0 f_1 + \omega_1 f_0)}{2},$$

де h – шаг інтегрування.

Рівняння (5.59) для цього випадку записується у вигляді:

$$\omega_1 = f_1 + \frac{h(\omega_0 f_1 + \omega_1 f_0)}{2}. \quad (5.63)$$

При $n = 2$ маємо, рис. 5.16, б)

$$\int_0^l \omega(l) f(L - l) dl = \frac{h(\omega_0 f_2 + \omega_1 f_1 + \omega_1 f_1 + \omega_2 f_0)}{2}.$$

У цьому разі рівняння (5.59) набуває вигляду:

$$\omega_2 = f_2 + \frac{h(\omega_0 f_2 + 2\omega_1 f_1 + \omega_2 f_0)}{2}. \quad (5.64)$$

У загальному випадку для довільного числа n маємо, рис. 5.16, в)

$$\int_0^l \omega(l) f(L - l) dl = \frac{h[(\omega_0 f_n + \omega_1 f_{n-1}) + \dots + (\omega_{n-1} f_1 + \omega_n f_0)]}{2}.$$

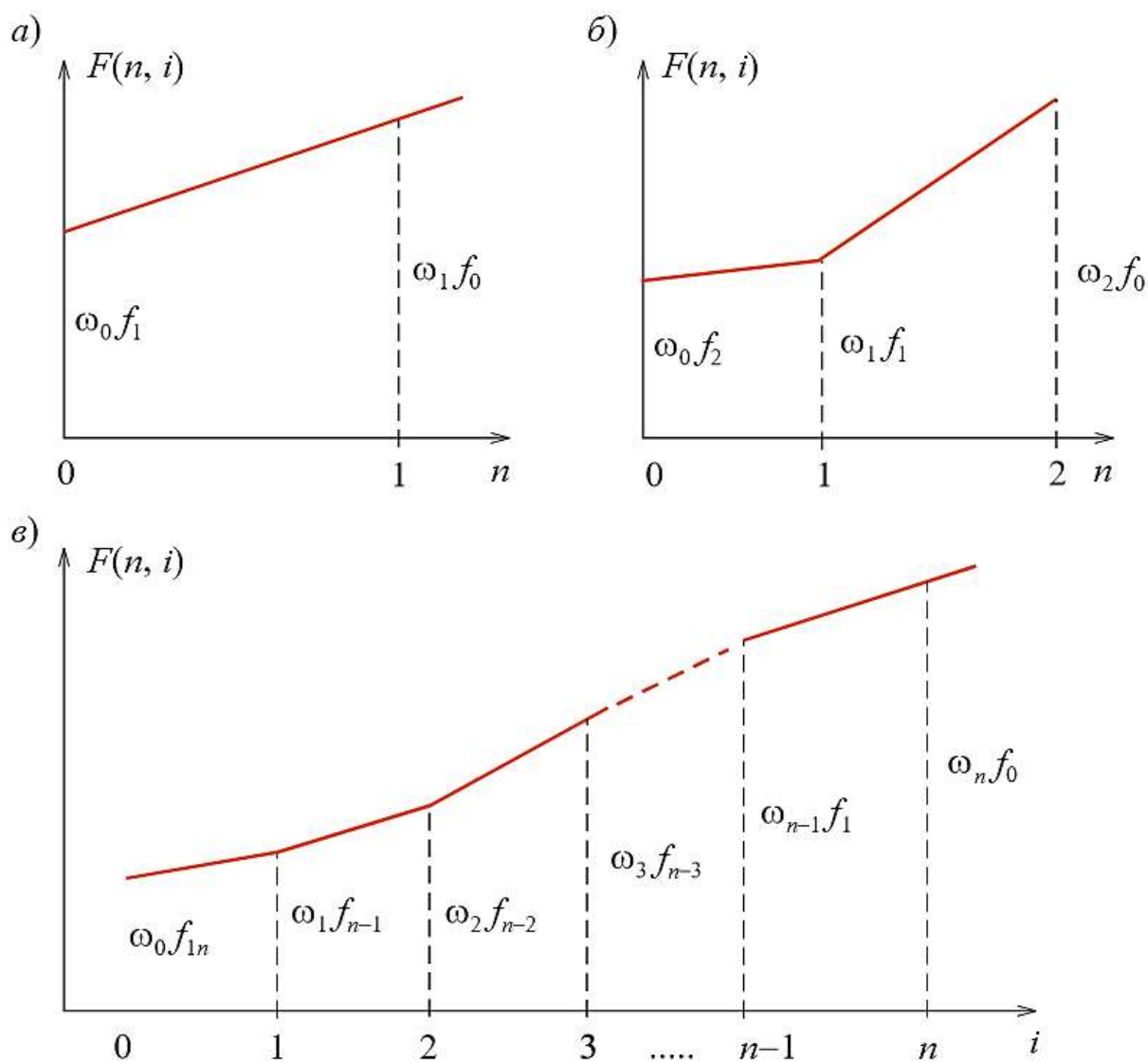


Рис. 5.16. Пояснення до чисельного розв'язання інтегрального рівняння за $n = 1$ (а), $n = 2$ (б) і загальний випадок (в)

З виразу (5.59) отримуємо:

$$\omega_n = f_n + \frac{h \left(\omega_0 f_n + \omega_n f_0 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i f_{n-i} \right)}{2}. \quad (5.65)$$

Таким чином, маємо таку систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = f_0; \\ \omega_1 = f_1 + \frac{h(\omega_0 f_1 + \omega_1 f_0)}{2}; \\ \dots\dots\dots \\ \omega_j = f_j + \frac{h\left(\omega_0 f_j + \omega_j f_0 + 2\sum_{i=1}^{j-1} \omega_i f_{j-i}\right)}{2}; \end{array} \right. \quad (5.66)$$

де $j = 2 \dots n$.

Система (5.66) дає змогу за відомим дискретним рядом значень густини розподілу наробітку на відмову f_i знайти ряд значень параметра потоку відмов ω_i

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = f_0; \\ \omega_1 = \frac{f_1 + \frac{h\omega_0 f_1}{2}}{1 - \frac{hf_0}{2}}; \\ \dots\dots\dots \\ \omega_j = \frac{f_j + \frac{h\left(\omega_0 f_j + 2\sum_{i=1}^{j-1} \omega_i f_{j-i}\right)}{2}}{1 - \frac{hf_0}{2}}; \\ j = 2 \dots n. \end{array} \right. \quad (5.67)$$

Якщо відомий ряд значень параметра потоку відмов ω , то за системою рівнянь (5.66) можна здійснити зворотний розв'язок інтегрального рівняння (5.59) і визначити ряд значень густини розподілу наробітку на відмову

$$\left\{ \begin{array}{l} f_0 = \omega_0; \\ f_1 = \frac{\omega_1 - h \cdot \frac{\omega_1 f_0}{2}}{1 + \frac{h\omega_0}{2}}; \\ \dots\dots\dots \\ f_j = \frac{\omega_j \cdot \left(1 - \frac{hf_0}{2}\right) - h \cdot \sum_{i=1}^{j-1} \omega_i f_{j-i}}{1 + \frac{h\omega_0}{2}}; \\ j = 2 \dots n. \end{array} \right. \quad (5.68)$$

Застосування методу скінченних різниць під час розрахунку параметра потоку відмов є кращим, особливо для випадків, коли вид закону розподілу наробіток між відмовами апріорі невідомий і визначити його неможливо.

Для нормального закону розподілу випадкової величини існує аналітичний розв'язок інтегрального рівняння (5.59)

$$\omega(l) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi i}} \exp \left[-\frac{(l - im)^2}{2\sigma^2 i} \right], \quad (5.69)$$

де m , σ – математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення випадкової величини (наробітку між відмовами) відповідно;
 l – значення наробітку;
 i – номер відмови від початку спостереження.

У результаті обчислення $\omega(l)$ за виразом (5.69) встановлено, що за умови $i > 10$ значення $\omega(l)$ практично не змінюється зі збільшенням l . На рис. 5.17 наведено результати розрахунку параметру потоку відмов типового устаткування електровозів, реалізовані чисельним методом розв'язання рівняння (5.59), викладеного вище, та аналітично за формулою (5.69) за умови $i = 10$. Обчислення значень параметра потоку відмов чисельним методом здійснювалося з кроком $h = \Delta l = 1$ тис. км.

Вибір такого кроку пояснюється тим, що міжремонтні пробіги локомотивів визначено відповідними документами з точністю до 1 тис. км, а наробіток на відмову устаткування теж зазвичай заокруглюються до 1 тис. км. Тому обраний крок інтегрування дає змогу отримати максимально можливий ступінь наближення результатів до аналітичного рішення.

Зіставлення результатів розрахунку параметра потоку відмов (див. рис. 5.17), проведене двома методами, свідчить про практичний збіг аж

до другої відмови. Оскільки основним завданням є запобігання першій відмові, до якої функції, отримані в результаті чисельного й аналітичного розв'язання збігаються, то точність чисельного методу можна вважати достатньою.

Зазвичай на практиці за статистичними даними про відмови розраховують оцінки параметра потоку відмов у різних інтервалах наробітку Δl , а за ними, розв'язуючи інтегральне рівняння (5.59) за допомогою рекурентних співвідношень (5.68) визначають густину розподілу наробітку між відмовами у вигляді дискретного ряду $f_0, f_1, \dots, f_n$. Інтегруючи функцію $f(l)$, визначають імовірність відмов $Q(l)$ і знаходять імовірність безвідмовної роботи: $P(l) = 1 - Q(l)$, а потім, інтегруючи функцію $P(l)$ у межах від 0 до ∞ , знаходять середнє значення наробітку на відмову.

Викладені алгоритми розрахунку показників безвідмовності відновлюваних об'єктів реалізовано під час розв'язання наступних завдань.

Приклад 5.8. Відмови ста відновлюваних об'єктів розподілилися таким чином як показано в табл. 5.3.

Необхідно визначити показники відмов $\omega(t)$, $P(t)$, $Q(t)$, $T_{\text{сер}}$, $\lambda(t)$.

Розв'язання. Оцінка параметра потоку відмов $\omega(t)$ розраховується за формулою (5.44):

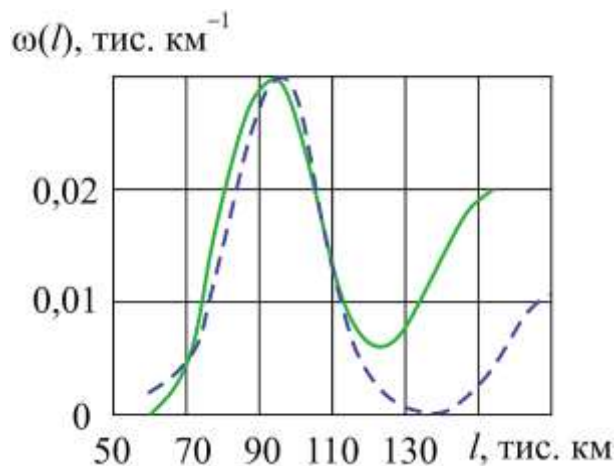


Рис. 5.17. Результати розрахунку параметру потоку відмов обладнання за $m = 94$ тис. км, $\sigma = 13$ тис. км методом кінцевих різниць (суцільна лінія) та аналітичним методом (штрихова)

Таблиця 5.3

Вихідні дані до прикладу 5.8.

Δt , год	0 – 200	200 – 400	400 – 600	600 – 800	800 – 1000	1000 – 1200	1200 – 1400	1400 – 1600	1600 – 1800
Δn	24	20	20	22	24	26	28	30	30

$$\omega_0^c = \frac{24}{100 \cdot 200} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \quad \omega_1^c = \frac{20}{100 \cdot 200} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$\omega_2^c = \frac{20}{100 \cdot 200} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \quad \omega_3^c = \frac{22}{100 \cdot 200} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

тощо.

Результати розрахунку $\omega(t)$ зведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Результати розрахунку

№ п/п	t , год	$\omega(t) \cdot 10^{-3}$, год ⁻¹	$f(t) \cdot 10^{-3}$, год ⁻¹	$Q(t)$	$P(t)$	$\lambda(t) \cdot 10^{-3}$, год ⁻¹
0	0	1,2	1,2	0	1	1,2
1	200	1,0	0,786	0,198	0,802	0,98
2	400	1,0	0,645	0,341	0,659	0,979
3	600	1,1	0,609	0,466	0,534	1,141
4	800	1,2	0,565	0,583	0,417	1,35
5	1000	1,3	0,517	0,691	0,309	1,67
6	1200	1,4	0,466	0,789	0,211	2,21
7	1400	1,5	0,415	0,877	0,123	3,38
8	1600	1,6	0,286	0,95	0,05	5,45

За низкою дискретних значень параметра потоку відмов $\omega_0^c, \omega_1^c, \dots, \omega_8^c$ розраховується низка дискретних значень густини розподілу народів на відмову $f_0^c, f_1^c, \dots, f_8^c$ за рекурентними формулами (5.68), де $h = 200$ год:

$$f_0^c = \omega_0^c = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$f_1^c = \frac{\omega_1^c - h \cdot \frac{\omega_1^c f_0^c}{2}}{1 + \frac{h\omega_0^c}{2}} = \frac{1,0 \cdot 10^{-3} - \frac{200}{2} \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{1 + \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2}} = 0,786 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$f_2^c = \frac{\omega_2^c \cdot \left(1 - \frac{hf_0^c}{2}\right) - h \cdot \omega_1^c \cdot f_1^c}{1 + \frac{h\omega_0^c}{2}} =$$

$$= \frac{1,0 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{200}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}\right) - 200 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,786 \cdot 10^{-3}}{1 + \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2}} = 0,645 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$f_3^c = \frac{\omega_3^c \cdot \left(1 - \frac{hf_0^c}{2}\right) - h \left(\omega_1^c \cdot f_2^c + \omega_2^c \cdot f_1^c\right)}{1 + \frac{h\omega_0^c}{2}} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{200}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}\right)}{1 + \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2}} -$$

$$- \frac{200 \cdot \left(1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,645 \cdot 10^{-3} + 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,786 \cdot 10^{-3}\right)}{1 + \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2}} = 0,609 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$f_4^c = \frac{\omega_4^c \cdot \left(1 - \frac{hf_0^c}{2}\right) - h \left(\omega_1^c \cdot f_3^c + \omega_2^c \cdot f_2^c + \omega_3^c \cdot f_1^c\right)}{1 + \frac{h\omega_0^c}{2}} =$$

$$= \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{200}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}\right)}{1 + \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2}} -$$

$$-\frac{200 \cdot 10^{-6} (1,0 \cdot 0,609 + 1,0 \cdot 0,645 + 1,1 \cdot 0,786)}{1 + \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2}} = 0,565 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Інші розрахунки виконуються аналогічним чином.

Інтегруючи дискретний ряд $f_0^c, f_1^c, \dots, f_8^c$ чисельним методом трапецій, знаходимо значення імовірності відмов $Q_1^c, Q_2^c, \dots, Q_8^c$, а за ними за формулою $P_i^c(t) = 1 - Q_i^c(t)$ визначаються значення імовірності безвідмовної роботи $P_1^c, P_2^c, \dots, P_8^c$.

Початкові значення $Q_0^c = 0, P_0^c = 1$.

Розрахунок ведеться за рекурентною формулою:

$$Q_i^c = Q_{i-1}^c + \frac{h}{2} (f_{i-1}^c + f_i^c),$$

$$Q_1^c = 0 + \frac{200}{2} (1,2 \cdot 10^{-3} + 0,786 \cdot 10^{-3}) = 0,198;$$

$$P_1^c(t) = 1 - 0,198 = 0,802,$$

$$Q_2^c = 0,198 + \frac{200}{2} (0,786 \cdot 10^{-3} + 0,645 \cdot 10^{-3}) = 0,341;$$

$$P_2^c(t) = 1 - 0,341 = 0,659,$$

$$Q_3^c = 0,341 + \frac{200}{2} (0,645 \cdot 10^{-3} + 0,609 \cdot 10^{-3}) = 0,466;$$

$$P_3^c(t) = 1 - 0,466 = 0,534.$$

Далі аналогічно. Результати всіх розрахунків зведено в табл. 5.4.

Середній наробіток на відмову розраховується за формулою (5.18). Чисельне інтегрування функції $P(t)$ проводиться методом трапецій

$$T_{\text{сер}} = \frac{1+0,802}{2} \cdot 200 + \frac{0,802+0,659}{2} \cdot 200 + \frac{0,659+0,534}{2} \cdot 200 + \\ + \frac{0,534+0,417}{2} \cdot 200 + \frac{0,417+0,309}{2} \cdot 200 + \frac{0,309+0,211}{2} \cdot 200 + \\ + \frac{0,211+0,123}{2} \cdot 200 + \frac{0,123+0,05}{2} \cdot 200 = 716 \text{ год.}$$

Незважаючи на те що інтенсивність відмов $\lambda(t)$ характеризує безвідмовність невідновлюваних об'єктів, цей показник доцільно розраховувати і для відновлюваних об'єктів. У цьому разі він характеризує інтенсивність виникнення так званих «первинних» відмов, на відміну від параметра потоку відмов, що враховує і повторні відмови.

Розрахунок інтенсивності відмов ведеться за формулою (5.27):

$$\lambda_0^c(t) = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{1} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_1^c(t) = \frac{0,786 \cdot 10^{-3}}{0,802} = 0,98 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_2^c(t) = \frac{0,645 \cdot 10^{-3}}{0,659} = 0,979 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1} \text{ тощо.}$$

Результати розрахунків зведено в табл. 5.4. За результатами розрахунку на рис. 5.18 побудовано графіки зміни показників надійності. Як видно з даних табл. 5.4 та рис. 5.18, інтенсивність відмов $\lambda(t)$ залишається приблизно рівною параметру потоку відмов $\omega(t)$ до наробітку 800 год, після чого інтенсивність відмов помітно збільшується з ростом наробітку, тобто якщо виріб, що відновлюється, жодного разу не відмовив до середнього значення наробітку, то надалі імовірність його відмови істотно збільшується.

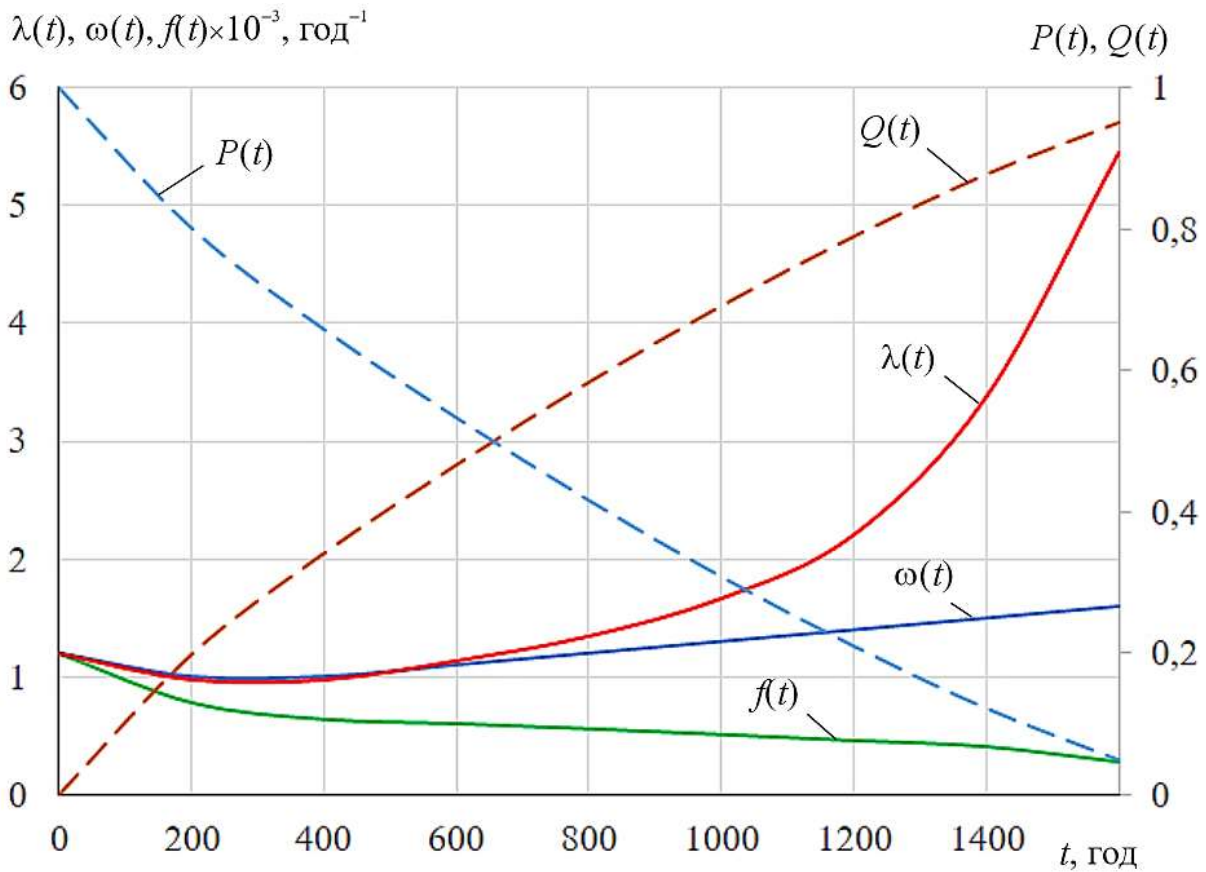


Рис. 5.18. Графіки зміни показників надійності

5.4. Основне рівняння надійності для невідновлюваних об'єктів

Зазвичай за результатами випробувань об'єктів, що не відновлюються, розраховують статистичну функцію інтенсивності відмов $\lambda^c(l)$, а через неї знаходять імовірність безвідмовної роботи $P^c(l)$ і оцінку середнього наробітку до відмови L_c^c .

Перепишемо вираз (5.24) у вигляді:

$$\lambda(l) = -\frac{dP(l)}{dlP(l)}.$$

Помноживши обидві частини рівності на $-dl$, отримаємо

$$\frac{dP(l)}{P(l)} = -\lambda(l)dl.$$

Проінтегрувавши обидві частини рівності в межах від 0 до l , отримаємо

$$\int_0^l \frac{dP(l)}{P(l)} = -\int_0^l \lambda(l)dl; \quad \ln P(l) - \ln P(0) = -\int_0^l \lambda(l)dl,$$

або з урахуванням того, що $\ln P(0) = \ln(1) = 0$, отримаємо

$$\ln P(l) = -\int_0^l \lambda(l)dl.$$

Потенціюючи отриманий вираз, отримаємо основне рівняння надійності для невідновлюваних виробів

$$P(l) = e^{-\int_0^l \lambda(l)dl}. \quad (5.70)$$

Також це рівняння є одним зі складових так званого «трикутника співвідношень» у теорії надійності, наведеного на рис. 5.19.

Після обчислення $P(l)$ за формулою:

$$L_c = \int_0^\infty P(l)dl$$

знаходимо

$$L_c = \int_0^\infty e^{-\int_0^l \lambda(l)dl} dl. \quad (5.71)$$

Під час практичного застосування співвідношень (5.70) та (5.71) в них використовуються статистичні оцінки відповідних показників $\lambda^c(l)$, $P^c(l)$ та L_c^c .

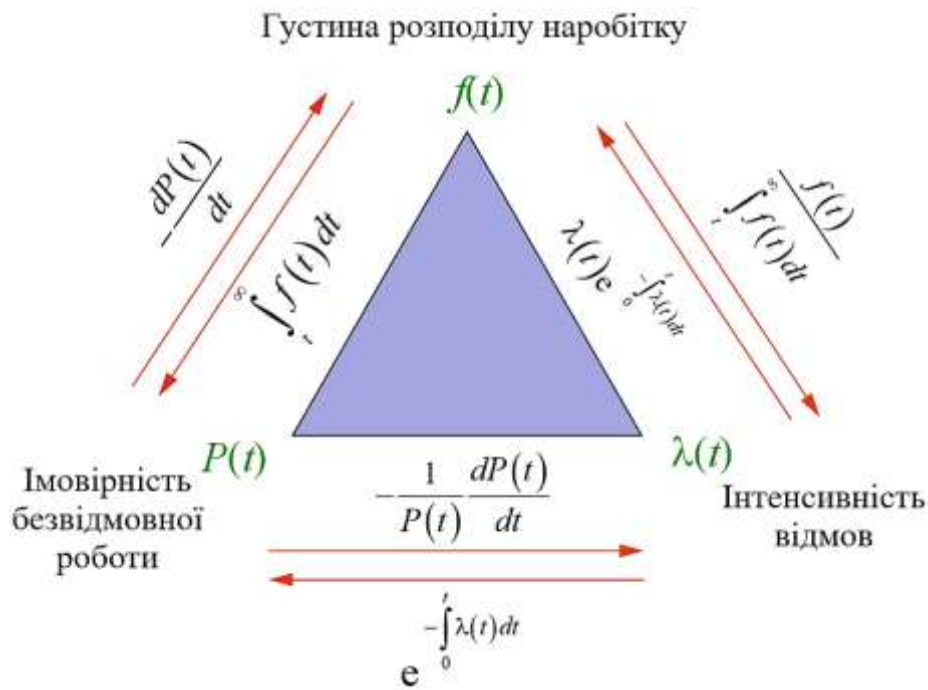


Рис. 5.19. Трикутник співвідношень

Запитання до самоконтролю

1. Що означає поділ об'єктів на відновлювані та невідновлювані?
2. Яка ситуація є специфічною при визначенні відновлюваності об'єкта на перегоні?
3. Чому деякі деталі, які відновлюються в умовах депо, вважаються невідновлюваними в інших умовах?
4. Наведіть приклади типових невідновлюваних елементів рухомого складу.
5. Як визначається наробіток до відмови?
6. Яка математична характеристика повністю описує розподіл випадкової величини наробітку?
7. Що таке функція надійності $P(l)$?
8. Яким чином змінюється функція надійності $P(l)$ зі збільшенням наробітку l ?
9. Яке геометричне тлумачення має функція надійності $P(l)$?
10. Як обчислюється статистична оцінка імовірності безвідмовної роботи?
11. Від яких чинників залежить точність статистичної оцінки функції надійності?
12. Від чого залежить вибір допустимого значення функції надійності $P(l)$?

13. Яке значення $P(l)$ вважається допустимим для відповідальних елементів рухомого складу, таких як осі колісних пар?
14. Які наслідки можуть бути при відмові колісної пари в залежності від її характеру?
15. Чому $P(l)$ вважається основним показником безвідмовності?
16. У яких випадках і для яких елементів показник $P(l)$ зазначається в технічних умовах?
17. Як пов'язаний $P(l)$ із параметром потоку відмов?
18. Що таке умовна імовірність безвідмовної роботи?
19. Як визначається імовірність безвідмовної роботи на інтервалі від l_1 до l_2 ?
20. Що таке імовірність відмови об'єкта за наробіток l ?
21. Як математично пов'язані функція надійності $P(l)$ та функція відмов $Q(l)$?
22. Чому події «відмова» і «безвідмовна робота» утворюють повну групу подій?
23. Яку іншу назву має функція $Q(l)$ у теорії надійності?
24. Що показує значення $Q(0)$ та як змінюється функція $Q(l)$ зі зростанням l ?
25. У якій точці графіки функцій $Q(l)$ та $P(l)$ перетинаються? Що означає ця точка?
26. Як геометрично інтерпретується значення імовірності відмови за наробіток l ?
27. Як виглядає формула статистичної оцінки імовірності відмови?
28. Який вплив має збільшення обсягу спостережень N на точність статистичної оцінки $Q(l)$?
29. Як називають графік функції $P^c(l)$, побудований за результатами експериментів?
30. Як визначаються статистичні оцінки функцій $P(l)$ і $Q(l)$ за результатами випробувань?
31. Що означає значення $P^c(1000)=0,9$ з практичної точки зору?
32. Яке фізичне значення має частота відмов?
33. Як математично визначається частота відмов через похідні функцій $F(l)$ або $P(l)$?
34. З якою іншою функцією збігається частота відмов?
35. Що характеризує максимум на графіку функції густини відмов $f(l)$?
36. Чому на спадаючій ділянці графіка $f(l)$ не можна говорити про зменшення схильності до відмов?

37. Який показник точніше описує зміну схильності об'єкта до відмов?
38. Як обчислюється статистична оцінка частоти відмов за інтервал наробітку Δl ?
39. Що таке гамма-відсотковий наробіток до відмови?
40. У чому полягає різниця між прямим і зворотним завданням при аналізі надійності?
41. Як позначається гамма-відсотковий наробіток до відмови?
42. Яке рівняння використовується для визначення l_γ через функцію густини $f(l)$?
43. Як можна визначити l_γ , використовуючи інтегральну функцію розподілу $F(l)$?
44. Яке поняття відповідає значенню l_γ у теорії імовірностей?
45. За яких умов можливе пряме аналітичне обчислення l_γ ?
46. Якими формулами визначається l_γ для:
 - нормального розподілу?
 - експоненційного розподілу?
 - розподілу Вейбулла?
47. Що означає, що гамма-відсотковий наробіток є нижньою довірчою межею?
48. Яке значення гамма-відсотка вважається допустимим для об'єктів із критичними наслідками відмов?
49. Який практичний зміст запису $l_\gamma=1,0$ млн км, $\gamma=0,95$?
50. Які функції використовуються для графічного визначення l_γ ?
51. Яке значення площі під кривою $f(l)$ відповідає імовірності безвідмовної роботи?
52. Який зміст має точка перетину кривих $P(l)$ і $F(l)$?
53. Яка залежність між $P(l_\gamma)$, $F(l_\gamma)$ та обраним рівнем γ ?
54. Які ще гамма-відсоткові показники можуть бути визначені за аналогією з l_γ ?
55. У яких випадках використовують апроксимацію емпіричних функцій теоретичними розподілами?
56. Чому важливо встановити розподіл наробітку перед обчисленням l_γ ?
57. Що таке середній наробіток до відмови?
58. Яким чином середній наробіток до відмови пов'язаний із математичним сподіванням?
59. Як записується формула математичного сподівання випадкової величини наробітку до відмови?

60. Який фізичний зміст має середній наробіток до відмови?
61. Як виглядає графічна інтерпретація цього показника?
62. Яка формула для середнього наробітку до відмови базується на функції надійності $P(l)$?
63. Чому добуток $l \cdot P(l)$ на межах інтегрування дорівнює нулю?
64. Що означає: середній наробіток до відмови чисельно дорівнює площі під кривою функції $P(l)$?
65. Як за графіками двох функцій $P_1(l)$ і $P_2(l)$ можна зробити оцінку їх середніх наробітків до відмови без розрахунків?
66. У якому випадку один з елементів буде вважатися більш надійним, виходячи з форми кривої $P(l)$?
67. Яка формула визначає дисперсію наробітку до відмови?
68. Чому дисперсія має обмежене практичне застосування?
69. Що таке середнє квадратичне відхилення і як воно обчислюється?
70. Для чого вводять коефіцієнт варіації? Як він обчислюється?
71. Як визначається статистична оцінка середнього наробітку до відмови для малої вибірки?
72. Який вигляд має формула для оцінки середнього наробітку за вибіркою великих обсягів?
73. У яких випадках краще використовувати формулу (5.23), а не (5.22)?
74. Яке обмеження мають обидві формули (5.22) і (5.23) щодо плану випробувань?
75. Як було визначено середній наробіток у прикладі з 1000 об'єктів, розподілених за інтервалами пробігу?
76. Як розраховано середній наробіток до відмови в прикладі з 12 об'єктами, для яких задані конкретні значення l_i ?
77. Що таке інтенсивність відмов згідно з ДСТУ 2860-94?
78. У чому полягає умовність величини інтенсивності відмов?
79. Як визначається імовірність безвідмовної роботи в інтервалі $[l, l+\Delta l]$?
80. Як записується вираз для інтенсивності відмов як функції $P(l)$ і її похідної?
81. Як пов'язана імовірність відмови в інтервалі Δl із інтенсивністю відмов?
82. Запишіть формулу для розрахунку інтенсивності відмов $\lambda(l)$ через функцію густини $f(l)$ та надійності $P(l)$.
83. Що відбувається з інтенсивністю відмов, коли $P(l) \approx 1$?

84. Як виглядає апроксимація $\lambda(l)$ для малих інтервалів Δl ?
85. Яке рівняння описує імовірність безвідмовної роботи через інтеграл від інтенсивності відмов?
86. Як визначається середній наробіток до відмови через $\lambda(l)$?
87. Як обчислюється статистична оцінка інтенсивності відмов за формулою (5.32)?
88. Який зміст має чисельник Δn і знаменник у формулі інтенсивності відмов?
89. Яка розмірність величини $\lambda(l)$?
90. Чому важливо правильно вибирати ширину інтервалу Δl у статистичному аналізі?
91. Як обчислюється середня кількість працездатних об'єктів у середині інтервалу?
92. Які переваги має інтенсивність відмов як показник надійності?
93. Як можна за відомою функцією $\lambda(l)$ обчислити кількість необхідних запасних частин?
94. У яких випадках не можна використовувати $\lambda(l)$ без вказівки значення l ?
95. Що таке λ -характеристика життєвого циклу об'єкта?
96. Яким чином формується емпірична функція інтенсивності відмов $\lambda^c(l)$?
97. Що відбувається з числом спостережуваних об'єктів у ході випробувань у разі розрахунку інтенсивності відмов?
98. Як розраховується $\lambda^c(l)$ для кожного інтервалу наробітку?
99. Яке значення береться як аргумент для функції λ^c у кожному інтервалі?
100. Як будується діаграма інтенсивності відмов?
101. Чим відрізняється емпірична функція $\lambda^c(l)$ від теоретичної $\lambda(l)$?
102. Які умови перетворення ступінчастої кривої $\lambda^c(l)$ на гладку криву $\lambda(l)$?
103. Назвіть три основні періоди λ -характеристики.
104. Що характерно для інтенсивності відмов у період припрацювання (період I)?
105. Які причини можуть викликати відмови в періоді нормальної експлуатації (період II)?
106. Які чинники призводять до зростання відмов у період старіння (період III)?
107. Якими методами зменшують кількість відмов у кожному з періодів λ -характеристики?

108. Чим відрізняється експлуатація відновлюваних і невідновлюваних об'єктів?
109. Що таке середній наробіток на відмову?
110. Як впливає тип відновлення (повне або часткове) на розподіл наробітку між відмовами?
111. Запишіть імовірнісну формулу середнього наробітку на відмову.
112. Який фізичний зміст має чисельник і знаменник у цій формулі?
113. Як розраховується статистична оцінка середнього наробітку для одного об'єкта та групи однотипних об'єктів?
114. Як розраховано середній наробіток на відмову у прикладі з трьома об'єктами?
115. Який висновок можна зробити про надійність на основі отриманих значень?
116. Як визначається середній наробіток на відмову згідно з ДСТУ 2860-94?
117. У чому різниця між повним і частковим відновленням об'єкта?
118. Як повне відновлення впливає на розподіл наробітку між відмовами?
119. Запишіть формулу для імовірнісної оцінки середнього наробітку на відмову.
120. Як виглядає статистична формула середнього наробітку на відмову для одного об'єкта?
121. Як формується статистична оцінка для групи об'єктів?
122. У прикладі з одним об'єктом: скільки відмов було зафіксовано і який був сумарний пробіг?
123. Яке значення середнього наробітку на відмову отримано для трьох об'єктів у прикладі?
124. Що таке параметр потоку відмов і як він позначається?
125. Чим параметр потоку відмов відрізняється від інтенсивності відмов?
126. Як обчислюється параметр потоку відмов за допомогою математичного сподівання?
127. Як визначається середній параметр потоку відмов? Наведіть формулу.
128. Який фізичний зміст має параметр потоку відмов у локомотивному господарстві?
129. Якою є формула імовірнісної оцінки параметра потоку відмов?
130. Яке практичне значення має статистична оцінка параметра потоку відмов?

131. Як визначити середню кількість відмов об'єктів у заданому інтервалі наробітку?
132. Що показує формула $\omega_{\text{ср}}=1/L_c$?
133. Які труднощі пов'язані з використанням $\omega(l)$ для визначення інших показників надійності?
134. Які переваги має показник $\omega(l)$?
135. Як за допомогою $\omega(l)$ визначити потребу в запасних частинах?
136. Які умови повинні виконуватись, щоб потік відмов вважався найпростішим?
137. Що означає стаціонарність потоку відмов?
138. У чому суть ординарності потоку відмов?
139. Як розуміти «відсутність післядії» в контексті потоку відмов?
140. Як виглядає формула розподілу Пуассона для кількості відмов у найпростішому потоці?
141. Що означає формула $P(l)=e^{-\lambda l}$ у контексті надійності?
142. Яким чином експоненційний розподіл спрощує розрахунки показників надійності?
143. Яке співвідношення існує між λ , ω та середнім наробітком?
144. Чому експоненційний закон розподілу порівнюють із законом Ома в електротехніці?
145. Чим обмежені результати, отримані з припущенням експоненційного розподілу?
146. Які складові формують загальну кількість відмов обладнання в інтервалі $[t, t+\Delta t]$?
147. Що таке «первинні відмови» в контексті аналізу надійності?
148. Як урахується повторна відмова обладнання при численні параметра потоку відмов?
149. У чому полягає зміст інтегрального рівняння (5.59) для параметра потоку відмов?
150. Чому інтегральне рівняння (5.59) не завжди вдається розв'язати аналітично?
151. Який метод використовується для чисельного розв'язання рівняння (5.59)?
152. Як змінюється рівняння (5.59) у випадках $n = 1$, $n = 2$ та загального випадку?
153. Для яких законів розподілу існує аналітичний розв'язок рівняння (5.59)?
154. У чому полягає перевага чисельного методу для розрахунку параметра потоку відмов у разі невідомого закону розподілу?

155. Як обчислюється імовірність безвідмовної роботи на основі параметра потоку відмов?

156. Що являє собою основне рівняння надійності для невідновлюваних виробів?

157. Як з формули інтенсивності відмов $\lambda(l)$ виводиться функція імовірності безвідмовної роботи?

158. Що таке «трикутник співвідношень» у теорії надійності та які показники він пов'язує?

159. У чому полягає різниця між інтенсивністю відмов і параметром потоку відмов для відновлюваних об'єктів?

160. Як можна оцінити середній наробіток до відмови за допомогою функції $P(t)$?

Ремонтопридатність рухомого складу

6.1. Ремонтопридатність як одна з найважливіших властивостей технічних об'єктів

Більшість сучасного рухомого складу, як і інші види технічних пристроїв з тривалими термінами служби, є відновлюваними, тобто дефекти, які виникли під час експлуатації та перешкоджають нормальному виконанню обумовлених конструкцією функцій, можуть бути усунені в процесі ремонту. Технічно справний стан машин і апаратів (об'єктів) у процесі експлуатації підтримується проведенням комплексу робіт профілактичного та відновлювального характеру.

Проблема створення конструкцій об'єктів, що володіють оптимальним рівнем ремонтпридатності, тобто оптимальною пристосованістю до робіт із підтримання та відновлення працездатності й ресурсу, охоплює комплекс питань, які вирішують під час проектування, виготовлення та експлуатації локомотивів і їхнього обладнання.

Розв'язання проблеми полягає в тому, щоб установити вимоги до ремонтпридатності та забезпечити їх виконання під час розроблення та виготовлення конструкцій. Крім того, необхідно визначити такі організаційно-технічні умови експлуатації та ремонту рухомого складу, за яких властивості конструкції, забезпечені під час проектування, використовувалися б якнайкраще.

Здійснювані в процесі експлуатації технічних об'єктів роботи з підтримання та відновлення працездатності характеризуються значними витратами праці, матеріальних і грошових коштів. Необхідно мати на увазі, що обслуговування та ремонт одиниць рухомого складу, що здійснюються в профілактичному або позаплановому порядку, супроводжуються їх виведенням з експлуатації, тобто значними економічними втратами.

Сучасний стан науки і техніки не дає змоги за прийнятних витрат на проектування та виробництво створювати конструкції машин і апа-

ратів, які б не потребували обслуговування та ремонту. Крім того, не виключається можливість аварій, унаслідок яких рухомий склад отримує суттєві пошкодження. Отже, одна з основних вимог до рухомого складу – це пристосованість їхньої конструкції до робіт, які здійснюються з метою підтримання та відновлення працездатного стану в процесі експлуатації. Відповідно до практики експлуатації технічних об'єктів, що склалася в нашій країні, сукупність робіт із підтримання і відновлення їхньої працездатності та ресурсу включає технічне обслуговування та ремонт. Однак не завжди можливо провести чітку межу між складом і призначенням робіт, що виконуються під час технічного обслуговування та ремонту. Це зумовлюється, насамперед, тим, що в системі технічного обслуговування машин передбачаються роботи ремонтного (відновлювального) характеру. І навпаки – до системи ремонтів включають роботи, характерні для технічного обслуговування.

Технічне обслуговування та ремонт поділяють на профілактичні, що здійснюються в плановому порядку, і випадкові, що проводяться в міру виникнення відмов або аварійних станів.

Властивість ремонтпридатності машин впливає на величину витрат праці, матеріальних і грошових коштів, що витрачаються в процесі експлуатації, і на тривалість простоїв у зв'язку з обслуговуванням та ремонтом.

Ремонтпридатність тісно пов'язана з іншими властивостями технічних об'єктів і, насамперед, з такими властивостями, як безвідмовність і довговічність. Машини, що володіють високим рівнем безвідмовності, як правило, характеризуються низькими витратами праці та коштів на підтримання їхньої працездатності та ресурсу і малим часом непрацездатного стану за розглянуті періоди експлуатації. Показники безвідмовності та ремонтпридатності машин є складовими частинами таких комплексних показників їхньої надійності, як коефіцієнт готовності K_r і деякі інші. У загальному випадку ремонтпридатність являє собою одну з властивостей конструкцій технічних об'єктів, що характеризують їхню якість.

Властивість ремонтпридатності закладається і забезпечується, як і інші властивості технічних об'єктів, під час їх проектування та виготовлення. Проявляється ця властивість у конкретних умовах використання об'єкта, тобто при впливі певного поєднання кліматичних факторів, організаційно-технічних умов обслуговування та ремонту тощо. Конструкційні особливості об'єкта та умови його використання обумовлюють кількісні значення показників ремонтпридатності.

Характеристики ремонтпридатності, що є функцією конструкційних та експлуатаційних факторів, являють собою змінні величини, які можуть змінюватися в певних межах. Отже, властивістю ремонтпридатності об'єктів можна керувати. Звідси випливає, що кількісні значення показників ремонтпридатності можна встановлювати, забезпечувати й оцінювати під час проєктування, виготовлення та експлуатації технічних об'єктів. Для ефективного управління властивістю ремонтпридатності об'єктів треба знати фактори, які впливають на цю властивість. Ці фактори можуть бути як кількісними, так і якісними. Успішне розв'язання задачі створення ремонтпридатних конструкцій можливе при знанні виду зв'язку між характеристиками ремонтпридатності та характеристиками факторів, що впливають на ремонтпридатність.

6.2. Поняття і термінологія в сфері ремонтпридатності технічних об'єктів

Пристосованість конструкцій технічних об'єктів до проведення робіт з метою підтримання і відновлення працездатного стану і ресурсу прийнято називати *ремонтпридатністю*. У технічній літературі англійською мовою цю властивість машин заведено характеризувати терміном «maintainability», що дослівно може бути перекладено як «обслуговуваність», тобто пристосованість до обслуговування. При цьому обслуговуваність тут розуміють у широкому сенсі слова: як пристосованість власне до обслуговування (догляду), так і до проведення ремонтних робіт.

Відповідно до [2], *ремонтпридатність* – це властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту».

Як випливає з визначення поняття «ремонтпридатність» є тісний зв'язок між технічним обслуговуванням і ремонтом. Сукупність різних видів технічного обслуговування і ремонту має розглядатися як єдине ціле, що становить частину системи технічного обслуговування та ремонту. Сутність цих систем перебуває в тісному зв'язку між собою, що слід враховувати під час їх розроблення. Однак кожній із розглянутих систем притаманні певні завдання, характер виконуваних робіт, місце виконання, склад застосовуваних технічних засобів, склад

і кваліфікація фахівців. А деяка частина робіт і операцій, характерних для однієї системи, знаходить застосування в іншій системі. Наприклад, для відновлення працездатності локомотивів під час капітального ремонту широко використовується заміна деталей, що вийшли з ладу, і складальних одиниць на нові або відновлені. Водночас заходи щодо попереджувальної заміни конструкційних елементів займають значну питому вагу в сукупності робіт, що виконуються під час технічного обслуговування.

У табл. 6.1 надано порівняння *технічного обслуговування (ТО)* та *ремонту* відповідно до ДСТУ 2860-94 [2] та ДСТУ 9050:2020 [4].

Таблиця 6.1

Визначення понять технічне обслуговування та ремонт

Поняття	Визначення відповідно до	
	ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення»	ДСТУ 9050:2020 «Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять»
Технічне обслуговування	Комплекс операцій чи операція для підтримки справного стану чи працездатності об'єкта при використанні його за призначенням, під час простою, зберігання та транспортування	Комплекс операцій чи операція для підтримування справного стану чи працездатності об'єкта під час застосування його за призначеністю, простоювання, зберігання й транспортування
Ремонт (ДСТУ 2890-94) Ремонтування (ДСТУ 9050:2020)	Комплекс операцій для відновлення справного стану чи працездатності об'єкта та відновлення ресурсів об'єктів чи їх складових частин	Комплекс операцій для відновлення справного стану чи працездатності об'єкта та відновлення ресурсу об'єкта чи його складників

При технічному обслуговуванні роботи мають *планово-попереджувальний характер і виконуються в обов'язковому порядку* протягом усього періоду експлуатації відповідно до вимог експлуатаційної документації заводу-виробника.

Кількість видів технічного обслуговування, їх періодичність і обсяг визначаються конструкційними особливостями та призначенням

об'єкта, умовами його експлуатації, вимогами до значень показників ефективності. Величини періодів між технічним обслуговуванням установлюють в одиницях календарного часу експлуатації об'єкта (у годинах, добах, роках) або в одиницях наробітку (у кілометрах пробігу, циклах спрацьовування, мотогодинах, одиницях виконаної роботи або продукції).

Ремонти, що здійснюються з метою відновлення працездатності об'єкта або його конструкційних елементів, мають забезпечувати їхнє використання із заданою ефективністю у відповідні міжремонтні періоди за умови, що встановлені види технічного обслуговування у відповідних міжремонтних періодах суворо виконуються. Відповідно до практики експлуатації тягового рухомого складу, що склалася, залежно від призначення, обсягу та характеру відновлювальних робіт, що виконуються, а також від складу технічних засобів, які використовуються при цьому, розрізняють поточні та капітальні ремонти.

*Поточний ремонт*¹ (ПР) проводять у процесі експлуатації рухомого складу для забезпечення його працездатності, він полягає в заміні або відновленні його окремих частин і їхньому регулюванні. Поточні ремонти необхідні в процесі експлуатації для підтримання рівня працездатності одиниці рухомого складу. Тут під процесом експлуатації розуміють згідно з ЄСКД сукупність періодів використання об'єкта за призначенням і проведення ТО і ремонтів. Залежно від виду ремонту роблять огляд, ревізії, регулювання, заміну і відновлення окремих складальних одиниць, якщо їхні параметри виходять за встановлені для умов експлуатації межі. Для тягового рухомого складу встановлено три види поточних ремонтів ПР-1, ПР-2 та ПР-3, що відрізняються об'ємом (кількістю виконуваних операцій) і періодичністю, при цьому всі операції ремонту меншого об'єму виконуються на ремонті більшого обсягу (операції ПР-1 входять до обсягу ПР-2, операції ПР-2 – до ПР-3, операції ПР-3 до КР-1, КР-1 до КР-2).

Капітальний ремонт КР-1 виконують з метою відновлення працездатності основних агрегатів рухомого складу шляхом їх заміни або відновлення працездатності до наступного капітального ремонту КР-1 або КР-2 та поточного ремонту решти агрегатів з подальшим випробуванням одиниці рухомого складу на працездатність. Під час ремонту КР-1 відновлюють експлуатаційні характеристики об'єкта і частково ресурс ремонтом або заміною тільки зношених чи пошкоджених

¹ Поточний ремонт – це планове ремонтування для забезпечення чи відновлення працездатності об'єкта з регулюванням механізмів та замінюванням та/чи відновленням окремих його частин.

складальних одиниць і деталей. При цьому обов'язково перевіряють технічний стан усіх складальних одиниць, виявлені відхилення від норми і пошкодження усувають. Норми допусків відхилень параметрів для складальних одиниць і деталей при капітальному ремонті КР-1 жорсткіші, ніж при поточному.

Капітальний ремонт КР-2 здійснюють з метою відновлення справності та повного, або близького до повного, відновлення ресурсу одиниці рухомого складу шляхом заміни або відновлення будь-яких його частин, включно з базовими, з подальшим проведенням випробувань машини на працездатність.

Капітальний ремонт з продовженням терміну служби (КРП) проводиться для відновлення експлуатаційних характеристик, справності та ресурсу на період продовження строку служби понад встановлений, а також модернізації всіх агрегатів, вузлів і деталей, включаючи базові, повної заміни кабельно-провідникової продукції та обладнання з виробленим ресурсом відповідно до технічних умов. Під час виконання КРП локомотивів та моторвагонного рухомого складу, яким виконувалася останній КР-2, заміну кабельно-провідникової продукції здійснюється в обсязі КР-1.

Необхідність проведення того чи іншого із зазначених тут видів ремонту та їхня періодичність для кожного типу технічних об'єктів і зміст виконуваних при цьому робіт визначаються їхніми конструкційними особливостями, характером виконуваних ними функцій, умовами експлуатації та низкою інших чинників.

Кожний вид технічного обслуговування та ремонту характеризується певною *періодичністю*¹ та *обсягом*² виконуваних робіт, які перебувають у певному зв'язку між собою та іншими, прийнятими для даного типу об'єктів, видами обслуговування і ремонту. Ця обставина дає змогу підтримувати заданий рівень ефективності роботи кожного типу об'єктів шляхом раціонального поєднання видів обслуговування і ремонту, їх періодичності та обсягу виконуваних робіт. Усі зазначені види технічного обслуговування і ремонту є плановими, тобто їх періодичність встановлюється нормативно-технічною документацією.

¹ Періодичність, відповідно до ДСТУ 9050:2020, – це інтервал часу чи наробіток між певним видом (ТО) (ремонткування) і наступним таким самим видом або іншим більшої складності.

² Обсяг (технічного обслуговування) (ремонткування), відповідно до ДСТУ 9050:2020, – це номенклатура операцій (ТО) (ремонткування), тривалість їхнього виконання, трудові, матеріальні та фінансові витрати, потрібні для (підтримування) (відновлення) працездатності об'єкта.

Крім планових ремонтів, існують так звані *непланові*¹ ремонти, які виконують у період між плановими видами ТО і ремонтів, тобто за необхідності відновлення працездатного стану, втраченого внаслідок відмови обладнання одиниці рухомого складу в процесі експлуатації.

6.3. Ремонтопридатність як складова якості та ефективності експлуатації

У процесі експлуатації технічних об'єктів їхні конструкції піддаються впливу двох протилежних за характером впливу процесів – зношування та відновлення, які, врешті-решт, визначають технічний стан і працездатність об'єктів на кожен момент часу їхнього використання, що розглядається.

З одного боку, внаслідок процесів зношування з'єднань і робочих органів, старіння матеріалів, розрегулювань і різних експлуатаційних пошкоджень відбувається поступове або стрибкоподібне погіршення технічного стану об'єкта в цілому і його окремих конструкційних елементів. З іншого боку, різні види технічного обслуговування та ремонту, що проводяться в процесі експлуатації, зменшують інтенсивність погіршення технічного стану, запобігають виникненню відмов і відновлюють працездатність об'єкта. Характер і режими цих двох процесів визначають тривалість непрацездатного стану технічного об'єкту, витрати праці та коштів на проведення технічного обслуговування і ремонтів.

Отже, необхідні властивості об'єктів, у тому числі й ремонтпридатність, закладаються при розробці їхніх конструкцій, забезпечуються при їхньому виготовленні і підтримуються в заданих межах у процесі експлуатації. З цього положення можна зробити два важливі для практики проектування технічних об'єктів висновки. По-перше, властивість ремонтпридатності є не єдиною, а часто і не головною властивістю об'єкта. Вирішення комплексу завдань, пов'язаних із завданням і забезпеченням цієї властивості, має здійснюватися з урахуванням забезпечення й інших властивостей об'єкта. По-друге, раціонального вирішення питань ремонтпридатності можна досягти лише за умов, коли ними охоплюються всі три етапи – проектування, вироб-

¹ Непланове ремонтування (неплановий ремонт), відповідно до ДСТУ 9050:2020, – це ремонтування, яке виконують без попереднього призначення.

ництва та експлуатації об'єктів. Тут маються на увазі рівень науково-технічного прогресу в цій галузі; організація робіт і праці під час експлуатації об'єктів; матеріально-технічне забезпечення їх експлуатації та ремонту; технічна оснащеність робіт і підготовка фахівців, що залучаються для їх виконання.

З розглянутих позицій проблема ремонтпридатності технічних об'єктів є частиною більш загальної проблеми їхньої якості.

Теоретичні дослідження і накопичений досвід практичних рішень дають змогу вказати основні напрями і найсуттєвіші питання розв'язання проблеми ремонтпридатності технічних об'єктів:

- встановлення єдиної термінології в галузі експлуатації, технічного обслуговування та ремонту технічних об'єктів;
- розробка загальних та окремих обов'язкових вимог до ремонтпридатності об'єктів;
- встановлення складу показників ремонтпридатності об'єктів, що вказуються в технічних завданнях на проектування і використовуються на різних етапах реалізації проекту;
- розробка методів завдання (нормування) і прогнозування показників ремонтпридатності;
- розробка рекомендацій і керівних матеріалів для забезпечення вимог ремонтпридатності при створенні та використанні об'єктів;
- розробка методів і керівних матеріалів щодо якісної та кількісної оцінки ремонтпридатності конструкцій технічних об'єктів різного призначення на етапі їх проектування;
- розробка методів і керівних матеріалів з планування випробувань технічних об'єктів з метою виявлення та визначення факторів, що впливають на характеристики ремонтпридатності;
- розробка системи збору та методів статистичного аналізу даних, необхідних для вирішення різних питань ремонтпридатності;
- розробка системи класифікації машин і апаратів як об'єктів експлуатації, обслуговування та ремонту;
- розробка методів і керівних матеріалів для встановлення змісту системи технічного обслуговування та ремонту технічних об'єктів відповідно до їх призначення та встановлених критеріїв ефективності використання;
- розробка методів і керівних матеріалів щодо раціональної організації обслуговування та ремонту з урахуванням особливостей конструкцій технічних об'єктів, їх призначення та умов експлуатації;
- розробка методів встановлення складу, потужності та технічного оснащення підрозділів технічного обслуговування і ремонту;

- розробка прогресивних технологічних методів відновлення конструкційних елементів, що втратили працездатність;
- розробка методів і нормативних керівних матеріалів щодо встановлення номенклатури та кількості запасних частин і матеріалів для різних видів машин і апаратів та умов їх експлуатації;
- розробка системи зберігання запасних частин і матеріалів, їх обліку, доставки споживачеві та порядку поповнення запасів;
- розробка раціональних методів визначення технічного стану об'єктів та їхніх конструктивних елементів;
- розробка та впровадження в практику проєктування, виготовлення та експлуатації машин і апаратів системи державних і галузевих стандартів у галузі ремонтопридатності, технічного обслуговування та ремонту;
- обґрунтування системи підготовки фахівців із забезпечення ремонтопридатності.

Перелічені напрями дають змогу зробити висновок про комплексний характер і складність проблеми, яку можна розв'язати в результаті системного підходу до неї і використання методів і апарату пошуку оптимальних рішень з урахуванням усього розмаїття чинників, що впливають на ремонтопридатність.

6.4. Аналіз чинників, що впливають на ремонтопридатність технічних об'єктів

Ремонтотпридатність конструкцій машин і апаратів, так само як і інші їхні експлуатаційні властивості, формується під впливом сукупності чинників конструкційного, виробничо-технологічного та експлуатаційного характеру. Склад і значущість кожної з цих груп чинників, а також характер їхнього впливу на показники ремонтотпридатності зумовлюються призначенням і конструкційними особливостями об'єкта, умовами його експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

З урахуванням дії різних чинників на характеристики ремонтотпридатності з'являється можливість цілеспрямовано впливати на ці характеристики або враховувати їх шляхом застосування відповідних технологічних і організаційних заходів. Для спрощення аналізу всю сукупність чинників ремонтотпридатності доцільно умовно поділити на дві групи: чинники, що визначають ремонтотпридатність конструкції як

властивість об'єкта, та чинники, які характеризують умови реалізації (прояву) цієї властивості в процесі експлуатації.

Фактори ремонтопридатності можуть розглядатися з позицій можливості управління ними та кількісного їх вимірювання. Значну частину факторів можна оцінити кількісно, деякі фактори мають якісний характер, вони не мають кількісної міри. Ці особливості чинників зумовлюють методи їх вивчення та оцінки.

Частину чинників у певних межах можна змінювати в потрібному напрямку, це – керовані чинники, інші виявляються некерованими. Значення чинників першої групи мають встановлюватися відповідно до стратегії управління ремонтопридатністю; фактори некеровані мають враховуватися під час проектування, виготовлення та експлуатації технічних об'єктів.

Конструкційні чинники. Під час розгляду впливу чинників конструкційного характеру на ремонтопридатність технічних об'єктів необхідно враховувати, що конструкційні рішення, які приймають на етапі створення машини, апарата, механізму, деталі, зумовлюють не тільки властивості її конструкції, а й характер їхнього прояву під час виготовлення та експлуатації. Вплив конструкційних особливостей об'єкта під час його виготовлення проявляється переважно у величині витрат на забезпечення необхідних властивостей у певних організаційно-технічних умовах виробництва. Дещо інакше йде справа з проявом конструкційних особливостей об'єктів у процесі експлуатації. Вони, насамперед, проявляються в характері реакції конструкції на чинні навантаження і зовнішні впливи. Кількісною мірою реакції конструкції об'єкта на зазначені впливи є інтенсивність зміни характеристик машини в процесі експлуатації.

Слід віддавати перевагу таким конструкціям, характеристики яких, зокрема безвідмовності, ремонтопридатності та довговічності, змінюються з малою інтенсивністю в процесі використання і при зміні режимів експлуатації. Створення конструкції, яка б зовсім не реагувала на зміну режимів її роботи, представляє великі труднощі, а в деяких випадках є економічно недоцільним. Однак можна вимагати, щоб вплив режимів роботи машини на зміну її характеристик не перевищував певних меж, встановлених з техніко-економічних міркувань.

Іншим напрямом прояву конструкційних особливостей технічного об'єкта є реакція, «чуйність», його конструкції на профілактичні та відновлювальні заходи в процесі експлуатації. Характеристикою цієї властивості конструкції об'єкта є витрати на його обслуговування і

ремонт, що здійснюються з метою підтримання і відновлення працездатного стану.

Конструкційні рішення, які приймають на етапі проєктування об'єкта, визначають характер і обсяг робіт, що мають виконуватися під час різних видів технічного обслуговування і ремонту за прийнятої періодичності або періодичності технічних обслуговувань і ремонтів для прийнятого характеру й обсягу робіт, які здійснюються з метою підтримання та відновлення працездатності й ресурсу об'єктів.

На конструкційні особливості технічних об'єктів накладаються також зовнішні чинники: кліматичні, тобто вплив температури, вологості, опадів, сонячної радіації; фактори зовнішнього середовища (його хімічний склад, забрудненість, біологічні чинники тощо); експлуатаційні – кваліфікація обслуговуючого персоналу, технічна оснащеність робіт під час обслуговування та ремонту об'єкта; потрібний склад і кількість запасних частин і матеріалів тощо.

У більшості випадків під час розробки конструкції вимоги до ремонтпридатності та інших властивостей об'єкта задовольняються паралельно. Наприклад, раціональне членування конструкції машини, забезпечення необхідного рівня стандартизації та уніфікації конструкційних елементів, конструкційне оформлення деталей і складальних одиниць машини є важливою умовою задоволення не тільки вимог ремонтпридатності, а й інших виробничих та експлуатаційних властивостей машини.

Складний характер впливу конструкційних чинників на властивості технічних об'єктів та їх взаємозв'язок з іншими факторами вимагає комплексного підходу до їхнього розгляду та обліку. Під час оцінювання впливу окремих конструкційних чинників на властивості об'єктів необхідно враховувати не тільки їхній вплив на ремонтпридатність, а й характер і напрямок впливу на інші властивості конструкції.

Конструкційні фактори впливають на тривалість непрацездатного стану машин через проведення технічного обслуговування і ремонтних робіт, а також на величину пов'язаних із цим витрат праці, матеріалів і грошових коштів.

Конструкційні чинники можна поділити на групи залежно від можливості їх кількісного оцінювання та результатів впливу на характеристики ремонтпридатності.

Залежно від можливості їх кількісного оцінювання розрізняють фактори, які можуть бути виміряні кількісно, і фактори, які не піддаються кількісному виміру, – якісні фактори. Приклади останніх – схемно-конструкційні рішення, конструкційне оформлення деталей і складаль-

них одиниць. Треба, однак, зазначити, що за допомогою методів експертних оцінок можна і кожен якісний фактор оцінити числовою величиною, наприклад, кількістю балів, що характеризує його значущість.

Залежно від результатів впливу на характеристики ремонтпридатності розрізняють фактори, результатом дії яких є переважно зміна витрат часу, праці та коштів на технічне обслуговування і ремонт, і фактори, що переважно впливають на строки служби конструкційних елементів і періодичність профілактичних заходів. До останніх факторів, наприклад, належать: матеріали, що застосовуються для виготовлення конструкційних елементів; термічна обробка деталей, виготовлених зі сталей; зміцнювальні технологічні процеси; значення і вид навантажень, що діють на несучі конструкційні елементи.

Розглянемо склад конструкційних чинників ремонтпридатності.

Фактори, що безпосередньо впливають на значення показників ремонтпридатності:

- раціональна розчленованість конструкції на відокремлені конструкційні елементи, що виготовляються і обслуговуються (блоки, механізми, складальні одиниці тощо). Чітке виділення таких частин у конструкції машини здебільшого дає змогу значно скоротити витрати часу і праці на проведення розбирально-складальних робіт під час технічного обслуговування і ремонту машини, спростити технологію контролю технічного стану і виявлення несправностей, відновлення працездатності машини агрегатним методом. Таке розміщення конструкційних елементів особливо важливе для частин машини, що містять швидкозношувані деталі та складальні одиниці;

- доступність конструкційних елементів для обслуговування і ремонту, особливості розташування деталей і сполучень у складальних одиницях, які є об'єктами систематичного контролю, інтенсивного обслуговування і ремонту. У кожному технічному об'єкті є деяка кількість конструкційних елементів, працездатність яких значною мірою визначає технічний стан об'єкта в цілому. Часто саме ці елементи піддаються найбільш інтенсивному впливу робочих навантажень або навколишнього середовища. Витрати часу, праці та грошових коштів на обслуговування і ремонт таких частин технічних об'єктів становлять основну частину експлуатаційних витрат. Обмеженість габаритів рухомого складу, зумовлена шириною залізничної колії, часто ускладнює забезпечення доступності конструкційних елементів для обслуговування. Наприклад, на електровозах серій ВЛ80 для заміни пошкодженої кулачкової шайби електровозного головного контролера (ЕГК) необхідно провести демонтаж дахового обладнання, зняти дах, прибрати з кузова

перехідний реактор, звільнити ЕГК від усіх електричних і механічних з'єднань, витягнути за допомогою мостового крана ЕГК з кузова і доставити в апаратний цех, де проводять розбирання ЕГК і спресовують кулачкові шайби з вала контролера, тобто для виконання елементарного обслуговування ЕГК для виконання елементарної ремонтної операції необхідно розібрати практично половину електровоза;

– пристосованість до контролю технічного стану (контролепридатність) складових частин об'єктів і раціональне розміщення та оформлення контрольних точок. Отримання в процесі експлуатації безперервної та об'єктивної інформації про технічний стан основних конструкційних елементів машини є однією з головних умов для прийняття правильних рішень щодо виду, періодичності та змісту здійснюваних профілактичних заходів. У практиці проектування та експлуатації локомотивів розроблено і широко застосовується велика кількість методів контролю технічного стану різних за конструкційним оформленням і принципами дії агрегатів. Часто завдання полягає в тому, щоб з великої сукупності методів і принципів контролю технічного стану агрегатів вибрати найбільш прийнятні для розглянутих конкретних умов. Однак забезпечення контролепридатності рухомого складу досі залишається актуальною проблемою. Так, у разі короткого замикання в силовому колі локомотива пошук місця пробоя ізоляції найчастіше триває від кількох годин до доби і більше. Відсутність контрольних точок змушує розділяти силове коло на окремі частини і «продзвонювати» мегомметром кожен з них, при цьому час перевірки стану різних елементів кола може відрізнятись на порядок. Наприклад, для «відокремлення» обмоток якоря тягового двигуна досить покласти пластини ізоляційного матеріалу під щітки, а «відокремлення» обмотки перехідного реактора електровоза змінного струму потребує від'єднання від неї силових мідних шин великого перерізу, закріплених туго затягнутими болтами. Скоротити середній час пошуку місця відмови можна, застосовуючи спеціальний алгоритм, відповідно до якого елементи системи перевіряються в порядку зменшення «коефіцієнта значущості», що залежить як від надійності цього елемента, так і від середнього часу, що витрачається на перевірку його стану;

– раціональне конструкційне оформлення місць роз'єму в поєднанні конструкційних елементів агрегатів (блоків, складальних одиниць тощо). У процесі контролю технічного стану, технічного обслуговування і ремонту агрегату потрібно здійснювати часткове його розбирання з метою забезпечення необхідного доступу і зручного проведення робіт. Мінімальні витрати часу і праці на розбірні роботи насам-

перед забезпечуються раціональним конструкційним оформленням місць роз'єму і кріпильних елементів поряд з іншими конструкційними заходами;

- наявність у конструкції агрегату змінних і регульованих конструкційних елементів у складальних одиницях, які піддаються найбільш інтенсивному впливу робочих навантажень і зовнішнього середовища, дає змогу знизити простої одиниці рухомого складу і витрати на його обслуговування і ремонт;

- наявність у конструкціях деталей і складальних одиниць технологічних баз, використовуваних у відновлювальних технологічних процесах. Значна частина конструкційних елементів агрегатів піддається відновленню, у зв'язку з чим збереження при виготовленні технологічних баз і їх використання при ремонті дає змогу досягти високої якості ремонтних робіт при відновленні та зниження витрат;

- раціональне конструкційне оформлення елементів технічного об'єкта, що дає змогу застосовувати під час ремонту високопродуктивні та технічно досконалі відновлювальні технологічні процеси. У практиці експлуатації та ремонту рухомого складу використовується багато способів відновлення працездатного стану конструкційних елементів, раціональна сфера застосування яких, наряду з факторами організаційно-технічного характеру, визначається значною мірою їхніми конструкційними особливостями. До цих особливостей, наприклад, можуть бути віднесені: взаємозамінність деталей і складальних одиниць, модульність (блоковість) конструкції, уніфікація вузлів рухомого складу різних серій, наявність контрольних точок (особливо в електросхемах) і бортової діагностики, доступність для проведення відновлювальних робіт; вид застосованих матеріалів; стан поверхневих шарів деталей; допустимість місцевого нагріву конструкції деталей і складальних одиниць тощо.

Зазначений перелік конструкційних чинників може бути значно розширено.

Конструкційні чинники, що переважно впливають на терміни служби елементів конструкцій технічних об'єктів. Ця група факторів чинить певний вплив на значення характеристик ремонтпридатності об'єктів, що проявляється через зміну частоти проведення профілактичних і відновлювальних заходів, які здійснюються з метою підтримання та відновлення працездатності конструкційних елементів.

Раціональні строки служби елементів машини встановлюють, зважаючи на величину витрат на виготовлення та експлуатацію машини

загалом або її складових частин за умови забезпечення вимог ефективності використання машини.

До конструкційних чинників цієї групи відносять такі:

- раціональний вибір матеріалів, з яких виготовляються конструкційні елементи машини. Матеріали повинні задовольняти не тільки значенням і характеру навантажень, що діють на них, а й вимогам технологічних процесів при виготовленні та ремонті;

- раціональний розподіл навантажень, що діють на конструкційні елементи під час експлуатації машини. Необхідно прагнути до того, щоб у конструкції машини не було елементів, які піддаються дії навантажень, що спричиняють вихід елементів з ладу до настання чергового планового ремонту і доступ до яких ускладнений. Нераціональний розподіл навантажень викликає необхідність збільшення розмірів поверхонь і поперечних перерізів деталей;

- раціональна конфігурація деталей і складальних одиниць та їх робочих поверхонь, що дає змогу застосовувати при виготовленні та ремонті зміцнювальні технологічні процеси, які значно підвищують їх терміни служби. У розпорядженні технолога і конструктора перебуває великий арсенал технологічних процесів, застосування яких дає змогу отримати вироби з потрібними термінами служби, їх ефект значно зростає за умови правильної конфігурації і навантаження деталей;

- раціональне конструкційне оформлення елементів машини, що забезпечує їх захист від несприятливого впливу зовнішнього середовища. Тут мають на увазі такі чинники, як волога і туман, солі, що містяться в атмосфері, пил і пісок, біологічні чинники тощо. Дія зазначених чинників часто є основною причиною зносу деталей і втрати працездатності елементами машини і машиною в цілому. Відповідне конструкційне оформлення елементів конструкції машини, працездатність яких визначається впливом перелічених чинників, дає змогу значно знизити або зовсім виключити їхній небажаний вплив.

Як впливає з розгляду факторів конструкційного характеру, більшість із них є керованими. Отже, під час розробки конструкції технічного об'єкта їх можна змінювати в бажаному напрямку і тим самим забезпечувати необхідний рівень характеристик його ремонтпридатності. Необхідно мати на увазі, що раціональні конструкційні рішення, які враховують вплив багатьох чинників, є лише потенційними умовами забезпечення необхідного рівня характеристик ремонтпридатності. Закладаються ж ці властивості під час виготовлення об'єктів і проявляються в процесі їх експлуатації.

Виробничо-технологічні чинники. Як і конструкційні, виробничо-технологічні фактори переважно впливають на тривалість і трудомісткість здійснення профілактичних і відновлювальних робіт під час експлуатації локомотивів, а також на терміни їхньої служби.

Виробничо-технологічні чинники ремонтпридатності можна розглядати у вигляді двох груп: чинники організаційно-технічного характеру і чинники технологічного характеру.

До першої групи зазвичай відносять фактори, що характеризують рівень організації праці та виробництва і мають великий вплив на забезпечення вимог ремонтпридатності, закладених під час розробки конструкції технічного об'єкта. Такими факторами, зокрема, є:

- стан організації праці та впровадження сучасних технологічних процесів;
- наявність на підприємстві досконалого технологічного обладнання та його технічний стан;
- досконалість застосовуваних методів контролю продукції, що виготовляється, і кваліфікація фахівців відділу технічного контролю (ВТК) підприємства.

Технологічні чинники є основним інструментом забезпечення необхідних властивостей об'єктів виробництва, в тому числі і властивостей ремонтпридатності рухомого складу під час виготовлення, а в процесі їхньої експлуатації – під час обслуговування та ремонту.

Найсуттєвішими факторами технологічного характеру є методи досягнення точності під час виготовлення деталей і складальних одиниць технічних об'єктів. Найчастіше розглядають чотири методи досягнення і підтримання точності конструкційних елементів:

- метод повної взаємозамінності;
- метод неповної взаємозамінності, коли частина виготовлених конструктивних елементів не взаємозамінна;
- метод конструкційної компенсації, коли необхідна точність сполучення досягається введенням у сполучення компенсаторів – нерухомих (шайб, прокладок) або рухомих (гвинтових пар, клинів, ексцентриків);
- метод технологічної компенсації, коли для досягнення необхідної точності одна або кілька поверхонь, що входять до сполучення, піддаються додатковій обробці під час складання, для чого передбачається відповідний припуск. Кожному з розглянутих методів забезпечення точності відповідає своя раціональна сфера та умови застосування. Тут виділяють:
- технологічні процеси, що забезпечують необхідні властивості поверхневого шару деталей. Такими технологічними процесами є: тер-

мічна і хіміко-термічна обробка (гартування струмами високої частоти (СВЧ), цементация, азотування тощо), наклеп (вібраційний, обкатуванням, дробоструменевий), нанесення на деталь шарів металу з поліпшеними властивостями. Використання в конструкції машин деталей з поліпшеними властивостями поверхневого шару дає змогу в широкому діапазоні подовжувати терміни їхньої служби;

– методи обробки поверхонь деталей і складальних одиниць, що забезпечують їх високу зносостійкість, корозійну стійкість тощо. Як технологічні процеси, що забезпечують такі властивості поверхонь, зокрема, знаходять застосування: чистове шліфування, хонінгування, суперфініш, електрополірування, полірування абразивами, нанесення гальванічних покриттів;

– технологічні процеси, режими та послідовність накладання швів і технологічного оснащення, що забезпечують мінімальні деформації та залишкові напруження в елементах під час зварювання металоконструкцій.

Наявність у зварній конструкції залишкових напружень є однією з основних причин зміни в процесі експлуатації машини розмірів і геометричної форми її окремих конструкційних елементів. Ці обставини можуть стати причиною частих відмов, а отже, і збільшення простою машини в непрацездатному стані, і призвести до підвищених витрат на підтримання та відновлення працездатності.

Експлуатаційні фактори. Експлуатаційні фактори визначають умови, в яких проявляються властивості конструкції, закладені під час її проектування і забезпечені під час виготовлення. Для конкретної конструкції та умов її використання експлуатаційні фактори визначають кількісні значення показників ремонтпридатності. Різниця умов експлуатації, обслуговування і ремонту технічних об'єктів через розкид діючих експлуатаційних чинників є причиною відхилень у значеннях показників ремонтпридатності для одного і того ж типу об'єкта.

Конструкційні особливості об'єкта зумовлюють значення характеристик ремонтпридатності та інтенсивність їх зміни під час зміни умов експлуатації. З одного боку, треба віддавати перевагу конструкціям машин, визначальні характеристики яких мало змінюються під час зміни умов експлуатації. З іншого боку, конструкція об'єкта повинна реагувати на профілактичні заходи, що здійснюються в процесі експлуатації, які є одним із найважливіших експлуатаційних чинників.

Експлуатаційні чинники можна розділити на дві групи: *організаційного* та *технічного* характеру.

Розглянемо чинники *організаційного* характеру.

1. Прийнята *система технічного обслуговування і ремонту об'єктів*¹. Системи технічного обслуговування і ремонту встановлюються відповідно до вимог, які висуваються до об'єктів, що перебувають в експлуатації. Наприклад, систему обслуговування і ремонту можна побудувати, виходячи з умови забезпечення максимального значення показників ефективності використання об'єктів або максимальної тривалості їхнього працездатного стану за розглянутий період експлуатації при певних витратах на виготовлення та експлуатацію. Систему обслуговування і ремонту можна побудувати і виходячи з урахування вимог мінімуму витрат на виготовлення та експлуатацію об'єктів за умови забезпечення заданого значення показників ефективності.

2. Організаційні *форми технічного обслуговування та ремонту об'єктів*. У практиці експлуатації технічних об'єктів, залежно від конкретних умов їх використання, застосовуються різні організаційні форми їх обслуговування та ремонту. Наприклад, найчастіше застосовується централізована форма обслуговування.

Залежно від виду обслуговуваних об'єктів і характеру виконуваних при цьому робіт технічне обслуговування можна проводити на спеціально обладнаних робочих місцях або за місцем знаходження об'єктів, що експлуатуються. У низці випадків обслуговування технічних об'єктів здійснюється експлуатаційним персоналом.

Найрізноманітніші організаційні форми застосовують під час ремонту об'єктів, що зумовлюється різноманітністю конструкцій, характером ремонтних робіт і кількістю об'єктів, які ремонтують. Наприклад, ремонт машин може бути індивідуальним, серійним і поточним (масовим). Ремонт можна проводити на спеціалізованих ремонтних підприємствах і експлуатуючих підприємствах.

Істотно скорочує час відновлення рухомого складу застосування агрегатного методу ремонту, при якому несправні агрегати замінюються новими або заздалегідь відремонтованими, а знятий з одиниці рухомого складу агрегат відправляється в спеціалізований цех для ремонту. При агрегатному методі ремонт одиниці рухомого складу зводиться до проведення демонтажних і монтажних робіт. Агрегатом може бути електричний апарат, тяговий двигун, колісна пара, колісно-моторний бік і навіть повністю укомплектований візок, причому чим більший за

¹ Система технічного обслуговування і ремонту, відповідно до ДСТУ 9050:2020, – це сукупність виконавців, технічних засобів, відповідної документації з ТО та ремонтування, потрібна для збереження працездатності (або справності) об'єкта протягом усього терміну експлуатування.

агрегат, тим значніше скорочується час відновлення працездатності одиниці рухомого складу.

Однак агрегатний метод ремонту має істотний недолік, оскільки застосування цього методу практично унеможлиблює врахування даних про напрацювання складальних одиниць до відмови. Оскільки більшість складальних одиниць не має технічних паспортів, то їхнє переміщення з однієї одиниці рухомого складу на іншу не документується, що не дає змоги в подальшому визначити їхнє сумарне напрацювання, накопичене за час їхньої послідовної роботи на кількох одиницях рухомого складу, а без цього напрацювання неможливо розрахувати показники безвідмовності складальних одиниць рухомого складу.

3. *Види, періодичність і обсяг профілактичних заходів.* Цей фактор чинить найсуттєвіший вплив на значення характеристик ремонтпридатності та ефективності технічних об'єктів. Розроблено і знаходять застосування методи встановлення оптимальних систем профілактики. Найчастіше таке завдання розглядають як екстремальне і формують у термінах оптимальних рішень. Метод розв'язання задачі визначається якістю наявної інформації про зміну характеристик працездатності об'єкта в процесі експлуатації, математичним апаратом, який використовують для опису процесу зміни його технічного стану та визначення характеристик системи профілактичних робіт.

Найчастіше опис процесу зміни технічного стану об'єкта здійснюють у термінах диференціального, лінійного, нелінійного та динамічного програмування, а також у термінах випадкових керованих марковських процесів і комбінаторного аналізу. Ці та інші методи оптимізації рішень дають змогу отримати оптимальну стратегію обслуговування та ремонту об'єктів різного призначення і конструкційного оформлення, однак відсутність необхідної інформації про характер зміни технічного стану об'єкта в процесі експлуатації часто не дає змоги отримати достатньо обґрунтовані рішення.

4. *Система забезпечення матеріалами і запасними частинами* технічних об'єктів, що перебувають в експлуатації. Технічне обслуговування і ремонт з використанням запасних частин набули широкого поширення в практиці експлуатації технічних об'єктів. Раціональна система забезпечення матеріалами і запасними частинами дає змогу за мінімуму витрат на їх придбання, зберігання і проведення робіт з технічного обслуговування та ремонту об'єктів забезпечувати необхідні значення їхніх показників ефективності та мінімальний час перебування на технічному обслуговуванні та в ремонті.

Обґрунтування системи забезпечення матеріалами і запасними частинами передбачає вирішення таких питань: встановлення номенклатури, визначення порядку і періодичності поповнення запасів, визначення кількості матеріалів і запасних частин кожного найменування, встановлення місць зберігання, порядку обліку і доставки до місця споживання.

Важливим питанням забезпечення технічних об'єктів запасними частинами є встановлення поняття «запасна частина»; це дасть змогу уточнити, які конструктивні елементи при прийнятих методах та організаційних формах обслуговування і ремонту, а також особливостей конструкції об'єкта можуть розглядатися як запасні частини. Залежно від вимог до часу перебування об'єкта на технічному обслуговуванні або в ремонті, а також вимог до витрат праці та грошових коштів як запасні частини можуть розглядатися окремі деталі, комплектувальні елементи, складальні одиниці. Вирішення цього питання значною мірою зумовлює номенклатуру запасних частин. Другим джерелом інформації для вирішення питання про номенклатуру запасних частин є відомості про терміни служби.

5. *Повнота і якість експлуатаційно-технічної та ремонтної документації.* Комплект експлуатаційно-технічної документації (ЕТД) охоплює технічний опис, правила технічної експлуатації, інструкції з технічного обслуговування та експлуатації, інструкції з управління локомотивом і його обладнанням, формуляр і паспорт.

Комплект ремонтної документації складається з керівних матеріалів і технічних умов з поточного, середнього і капітального ремонтів, ремонтних креслень, відомостей і норм витрат матеріалів і запасних частин. Експлуатаційна та ремонтна документація повинна відображати прийнятну систему обслуговування і ремонту для розглянутого виду технічних об'єктів.

Розглянемо *експлуатаційні чинники технічного характеру.*

1. *Види та зміст технологічних процесів технічного обслуговування і ремонту.* Для кожного виду технічного обслуговування відповідно до його призначення встановлюють порядок огляду і перевірки працездатності об'єкта та його складових частин, обсяг і порядок розбирання, переліки і зміст робіт з регулювання і заміни конструкційних елементів, переліки застосовуваного обладнання, контрольно-виміральної апаратури, інструменту та іншого, порядок збирання і контролю працездатності.

Технологічні процеси ремонту містять вказівки про порядок, режими і нормативи часу на демонтаж і розбирання об'єкта ремонту,

дефектацію, ремонт деталей і складальних одиниць, складання та випробування відремонтованої машини або її складових частин.

2. *Технічна оснащеність робіт під час технічного обслуговування та ремонту.* Технічна озброєність фахівців, які здійснюють технічне обслуговування і ремонт, істотно впливає на величину витрат часу і праці та якість технічного обслуговування і ремонту.

Види і кількість технологічного обладнання, що використовується під час технічного обслуговування і ремонту машин кожного типу, встановлюються відповідно до вимог щодо часу і якості технічного обслуговування і ремонту та економічної ефективності його застосування.

Розглянуті фактори конструкційного, виробничо-технологічного та експлуатаційного характеру безпосередньо або опосередковано впливають на формування властивостей ремонтпридатності технічних об'єктів і кількісні значення характеристик, що використовуються для задавання та оцінки цієї властивості.

6.5. Показники ремонтпридатності

Для того щоб управляти властивістю ремонтпридатності, необхідно мати у своєму розпорядженні набір показників. Кількісні характеристики ремонтпридатності, як і інших властивостей надійності, є випадковими величинами. Тому для їх визначення використовують математичний апарат теорії імовірностей, математичної статистики та теорії масового обслуговування.

Встановлювані для конкретних видів технічних об'єктів та умов їхньої експлуатації показники ремонтпридатності повинні задовольняти низці вимог, у тому числі:

- забезпечувати можливість їх кількісного завдання та визначення статистичними методами на етапах створення, випробувань та експлуатації об'єктів;
- давати змогу оцінювати найсуттєвіші фактори, які характеризують пристосованість виробів до ремонту й технічного обслуговування, та бути чутливими до їхньої зміни;
- давати змогу проводити порівняльну оцінку однотипних об'єктів, які працюють у різних організаційно-технічних умовах експлуатації;

- давати змогу проводити порівняльну оцінку об'єктів різного типу, призначених для виконання однакових функцій, і тих, що працюють в однакових організаційно-технічних умовах експлуатації;
- забезпечувати можливість їхнього використання під час визначення комплексних показників, що характеризують якість і надійність технічних пристроїв і систем.

Показники ремонтопридатності мають бути задані в технічному завданні на проектування й оцінюватися під час розроблення конструкції та виготовлення технічних об'єктів, у процесі їхніх випробувань і експлуатації.

Держстандартом ДСТУ 2860-94 [2] встановлено такі показники ремонтопридатності.

6.5.1. Імовірність відновлення

Імовірність відновлення $V(t)$ – це імовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкта не перевищить заданого значення.

Час відновлення працездатного стану технічного об'єкта є випадковою величиною, вичерпною характеристикою якої є закон розподілу, що задається в інтегральній формі – у вигляді функції розподілу $F_b(t)$ або в диференціальній формі – у вигляді густини розподілу $f_b(t)$.

За визначенням, функція розподілу – це імовірність того, що випадкова величина часу відновлення τ_b набуде значення, меншого за задане t

$$F_b(t) = P[\tau_b \leq t]. \quad (6.1)$$

Нерівність $\tau_b \leq t$ означає, що за час t відновлення працездатності об'єкта буде закінчено, тобто імовірність $P[\tau_b \leq t]$ є імовірністю відновлення працездатного стану за заданий час t , або імовірність відновлення $V(t)$. Таким чином

$$V(t) \equiv F_b(t). \quad (6.2)$$

Якщо $\tau_b > t$, то за час t відновлення працездатного стану об'єкта не буде закінчено, отже, імовірність $P[\tau_b > t]$ – це імовірність події, яка полягає в тому, що відновлення працездатного стану об'єкта не закінчиться за час t , або імовірність невідновлення

$$W(t) = P[\tau_b > t]. \quad (6.3)$$

Відновлення і невідновлення працездатного стану є протилежними подіями, тому

$$V(t) + W(t) = 1. \quad (6.4)$$

Знаючи одну з цих імовірностей, знаходимо іншу:

$$V(t) = 1 - W(t); \quad (6.5)$$

$$W(t) = 1 - V(t).$$

Оскільки час відновлення істотно невід’ємна величина, то основні властивості функції розподілу $F_b(t)$ мають вигляд:

$$F_b(0) = V(0) = 0; \quad F_b(\infty) = V(\infty) = 1;$$

$$V(t_1) \leq V(t_2), \quad \text{якщо} \quad t_1 \leq t_2,$$

$$V[t_1 < \tau_b < t_2] = V(t_2) - V(t_1).$$

Графіки функцій $V(t)$ та $W(t)$ наведено на рис. 6.1.

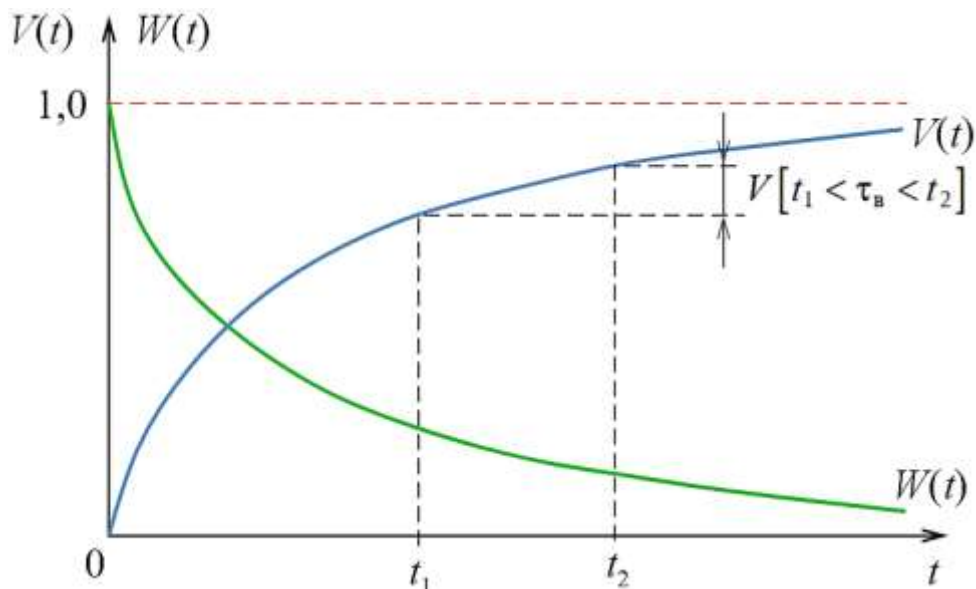


Рис. 6.1. Графіки функцій $V(t)$ та $W(t)$

Диференціюючи вираз (6.2), одержуємо густину розподілу часу відновлення

$$f_b(t) = F'_b(t) = V'(t) = -W'(t) = -\frac{dW(t)}{dt}. \quad (6.6)$$

Вид залежності $f_b(t)$ визначається тим, яким законом розподілу описується час відновлення. Найчастіше він описується гамма-розподілом або нормальним розподілом.

Густина гамма-розподілу часу відновлення задається формулою:

$$f_b(t) = \frac{1}{\Gamma(k)} \lambda^k t^{k-1} e^{-\lambda t}, \quad (6.7)$$

де λ та k – параметри розподілу, що виражаються через математичне сподівання T_b та дисперсію $D(t_b)$ часу відновлення.

$$\lambda = \frac{T_b}{D(t_b)}, \quad k = \frac{T_b^2}{D(t_b)}. \quad (6.8)$$

$\Gamma(k)$ – гамма-функція, що визначається за формулою:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} e^{-x} dx.$$

Для цілих k справедливо $\Gamma(k) = (k-1)!$.

Густина нормального розподілу часу відновлення має вигляд:

$$f_b(t) = \frac{1}{\sigma(t_b)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_b)^2}{2\sigma^2(t_b)}}. \quad (6.9)$$

Тут T_b і $\sigma(t_b)$ – математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення часу відновлення.

Графіки функцій $f_b(t)$ показано на рис. 6.2. Тут видно, що зі збільшенням параметра k гамма-розподіл асимптотично наближається до

нормального і стає невідмітним від нього за $k \geq 12$. Окремим випадком гамма-розподілу за $k = 1$ є експоненційний розподіл.

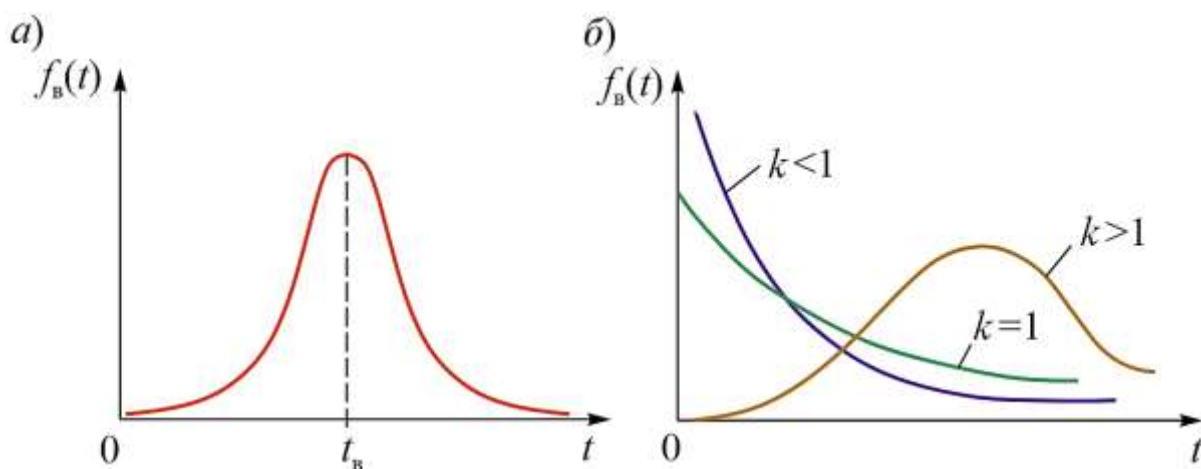


Рис. 6.2. Графіки $f_B(t)$ при нормальному розподілі а) та гамма-розподілі б)

Статистична оцінка імовірності відновлення

$$V^c(t) = \frac{n_B(t)}{N_{\text{ов}}}, \quad (6.10)$$

де $n_B(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили, час ремонту яких менший за заданий час t ;

$N_{\text{ов}}$ – кількість об'єктів, що відмовили, які підлягають ремонту (знаходяться у ремонті).

6.5.2. Середня тривалість відновлення

Середня тривалість відновлення – це математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови.

Показник використовується для характеристики середніх витрат часу на виконання робіт з відновлення працездатного стану одиниці рухомого складу на непланових ремонтах (без урахування часу на очікування відновлення). У час відновлення входить і час, витрачений на виявлення місця та причини відмови. Таким чином середня тривалість відновлення характеризує тяжкість наслідків відмов і ремонтпридат-

ність складальної одиниці, що відмовила. Середня тривалість відновлення залежить від рівня організації робіт у депо з відновлення одиниці рухомого складу після відмов, які, своєю чергою, залежать від кваліфікації ремонтного персоналу, оснащеності депо ремонтним устаткуванням, забезпеченості запасними частинами та від інших суб'єктивних і об'єктивних чинників.

Імовірнісне визначення середньої тривалості відновлення

$$T_B = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt. \quad (6.11)$$

Перетворимо цей вираз, замінивши $f_B(t)$ відповідно до (6.6)

$$T_B = \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dW(t)}{dt} \right) dt = - \int_0^{\infty} t dW(t). \quad (6.12)$$

Візьмемо інтеграл у виразі (6.12) по частинах. Покладемо:

$$u = t, \quad du = dt, \quad dv = dW(t), \quad v = W(t).$$

Тоді

$$\int_0^{\infty} t dW(t) = tW(t) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} W(t) dt = - \int_0^{\infty} W(t) dt,$$

оскільки добуток $tW(t)$ дорівнює нулю при підстановці як верхньої, так і нижньої межі інтегрування. Таким чином, математичне сподівання – середній час відновлення працездатності об'єкта, що відмовив, визначається за виразом

$$T_B = \int_0^{\infty} W(t) dt, \quad (6.13)$$

тобто воно чисельно дорівнює площі, обмеженій графіком функції $W(t)$ і координатними осями.

Показник розкиду тривалості відновлення – його дисперсія – визначається за формулою:

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_B)^2 f_B(t) dt, \quad (6.14)$$

а середнє квадратичне відхилення – за формулою:

$$\sigma(t) = \sqrt{D(t)}. \quad (6.15)$$

Статистична оцінка середньої тривалості відновлення

$$T_B^c = \frac{1}{N_{\text{ов}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ов}}} t_{\text{в}i}, \quad (6.16)$$

де $t_{\text{в}i}$ – час витрачений на i -те відновлення (ремонт).

6.5.3. Інтенсивність відновлення

Інтенсивність відновлення – умовна густина імовірності відновлення працездатності об'єкта, визначена для одного моменту часу, за умовою, що до цього моменту відновлення не завершилося.

Імовірнісне визначення інтенсивності відновлення

$$\mu(t) = \frac{V'(t)}{W(t)} = -\frac{W'(t)}{W(t)} = \frac{f_B(t)}{1-V(t)}. \quad (6.17)$$

Тоді імовірність відновлення за час t

$$V(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}. \quad (6.18)$$

Статистична оцінка інтенсивності відновлення

$$\mu^c(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{\text{ов сеп}} \cdot \Delta t}, \quad (6.19)$$

де $n_B(\Delta t)$ – кількість відновлених однотипних об'єктів за інтервал Δt ;

$N_{\text{ов сер}}$ – середня кількість об’єктів, що знаходяться в невідновленому стані в інтервалі Δt .

У статистичному сенсі інтенсивність відновлення – це кількість відновлень за одиницю часу, що припадають на один об’єкт, працездатність якого не було відновлено на початок розглянутого проміжку часу.

6.5.4. Гамма-відсоткова тривалість відновлення

Гамма-відсоткова тривалість відновлення – інтервал часу, протягом якого відновлення працездатності об’єкта здійсниться зі імовірністю γ , вираженою у відсотках.

6.5.5. Середня інтенсивність відновлення

Середня інтенсивність відновлення – середнє значення інтенсивності відновлення в заданому інтервалі часу.

6.5.6. Середня трудомісткість технічного обслуговування (ремонту)

Середня трудомісткість технічного обслуговування (ремонту) – математичне сподівання трудомісткості технічного обслуговування та (або) ремонту, виражене в людино-годинах.

6.5.7. Взаємозв’язок між показниками ремонтпридатності

Перетворимо вираз (6.17) до вигляду

$$\mu(t) = \frac{V'(t)}{W(t)} = -\frac{\frac{dW(t)}{dt}}{W(t)} = -\frac{dW(t)}{W(t)dt}. \quad (6.20)$$

Помножимо ліву і праву частини виразу (6.20) на $(-dt)$

$$-\mu(t)dt = \frac{dW(t)}{W(t)}. \quad (6.21)$$

Проінтегруємо вираз (6.21)

$$-\int_0^t \mu(t)dt = \int_0^t \frac{dW(t)}{W(t)}. \quad (6.22)$$

Інтеграл, що стоїть у правій частині виразу (6.22), має вигляд

$$\ln W(t) \Big|_0^t = \ln W(t) - \ln W(0).$$

Оскільки $W(0) = 1$, а $\ln 1 = 0$, то права частина виразу (6.22) дорівнює $\ln W(t)$, і цей вираз набуває вигляду:

$$\ln W(t) = -\int_0^t \mu(t)dt. \quad (6.23)$$

Потенціюючи вираз (6.23), отримуємо

$$W(t) = e^{-\int_0^t \mu(t)dt}. \quad (6.24)$$

Імовірність відновлення працездатного стану об'єкта, що відмовив, за час t дорівнює:

$$V(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t)dt}. \quad (6.25)$$

6.5.8. Показники ремонтпридатності рухомого складу залізничного транспорту, що встановлюються галузевими стандартами

Процес відновлення працездатності, крім часу його здійснення, характеризується також низкою техніко-економічних параметрів, основними з яких є трудомісткість і вартість проведення робіт із відновлен-

ня працездатності об'єкта, що відмовив. Трудомісткість і вартість, так само як і час відновлення працездатності, є випадковими величинами й описуються аналітичними виразами, аналогічними вищенаведеним вище. На практиці звичайно використовують середні значення цих величин. Так, галузевими стандартами установлені наступні показники ремонтпридатності рухомого складу залізничного транспорту:

- *середня вартість технічного обслуговування (ремонту)* – математичне сподівання вартості одного технічного обслуговування (або ремонту) даного виду за певний період експлуатації або наробітку;

- *середня сумарна тривалість технічних обслуговувань (або ремонтів)* – математичне сподівання сумарної тривалості технічних обслуговувань (або ремонтів) за певний період експлуатації або наробітку;

- *середня сумарна трудомісткість технічного обслуговування (або ремонтів)* – математичне сподівання сумарної трудомісткості технічних обслуговувань (або ремонтів) за певний період експлуатації або наробітку;

- *середня сумарна вартість технічних обслуговувань (або ремонтів)* – математичне сподівання сумарної вартості технічних обслуговувань (або ремонтів) за певний період експлуатації або наробітку;

- *питома сумарна тривалість технічних обслуговувань (або ремонтів)* – відношення середньої сумарної тривалості даного виду технічного обслуговування (або ремонту) до середнього наробітку за той самий період;

- *питома сумарна трудомісткість технічного обслуговування (або ремонтів)* – відношення середньої сумарної трудомісткості цього виду технічного обслуговування (або ремонту) до середнього наробітку за той самий період;

- *питома сумарна вартість технічних обслуговувань (або ремонтів)* – відношення середньої сумарної вартості даного виду технічного обслуговування (ремонтів) до середнього наробітку за той самий період;

- *об'єднана питома сумарна трудомісткість технічних обслуговувань і ремонтів* – відношення сумарної трудомісткості технічного обслуговування та ремонтів до заданого наробітку;

- *об'єднана питома сумарна тривалість технічних обслуговувань і ремонтів* – відношення сумарної тривалості технічних обслуговувань і ремонтів до заданого наробітку.

6.5.9. Практичне застосування показників ремонтопридатності

Показники ремонтопридатності, так само як і безвідмовності, включають у технічні умови (ТУ) і технічні завдання (ТЗ) на створення рухомого складу.

Показники ремонтопридатності на практиці використовують для розв'язання двох істотно різних груп задач.

Перша з цих груп – оцінка ремонтопридатності локомотива в точній відповідності з визначенням цієї властивості, складовими якої є легкість, доступність, контролепридатність, уніфікованість і т. ін., тобто якості, що характеризують пристосованість конструкції рухомого складу до виконання робіт технічного обслуговування (ТО) і ремонту.

Випробування рухомого складу «на ремонтопридатність» (відповідно до Держстандартів для таких випробувань) можуть проводитися на заводі-виробнику. При цьому макетний або дослідний зразок одиниці рухомого складу повинен піддаватися контролю (огляду, вимірам, діагностуванню) і розбиранню, що імітує роботи, передбачені тимчасовим посібником з експлуатації та ремонту (розробленим тим самим заводом-виробником). Повинні фіксуватися основні витрати праці та часу, експертно оцінюватися технологічність виконання різних робіт. З використанням розрахункових (проектних) значень показників безвідмовності та довговічності складальних одиниць, а також рекомендованих періодичності та обсягу ТО і ПР можуть бути обчислені орієнтовні значення витрат на ТО і плановий ремонт кожного виду, а також питомі витрати (праці, часу, коштів) на ТО і ремонт. Результати зіставляються зі значеннями, заданими в ТЗ і ТУ на створення локомотива.

Однак зазвичай випробуванням на ремонтопридатність піддається одна одиниця рухомого складу із дослідної групи, і такі випробування проводяться в депо. Вони полягають у виконанні ПР-2 або ПР-3 з організацією хронометражу, експертного оцінювання технологічності виконання низки операцій. За результатами таких випробувань виробляються рекомендації для коригування конструкції низки складальних одиниць, зчленування деталей тощо, уточнюються вимоги до оснащення депо технологічним обладнанням. За результатами вимірювань оцінюється ступінь зношеності деталей, визначається ступінь (коефіцієнт) змінюваності деталей тощо. Існує методика приймальних експлуатаційно-ремонтних випробувань (тільки для тепловозів).

Друга група задач, для розв'язання яких використовують показники ремонтопридатності (наприклад, середні та питомі фактичні витрати

праці та часу в депо, а також собівартість ТО і ремонту) – це контроль величини поточних витрат на технічне утримання парку рухомого складу, визначення залежності таких витрат від серії, віку рухомого складу, від умов його експлуатації та ремонту. Це необхідно для планування роботи господарства, формування вимог до ремонтпридатності нового (замовлюваного або придбаного) рухомого складу, коригування нормативного терміну служби рухомого складу, оцінки продуктивності праці ремонтного персоналу тощо.

Якщо під час випробувань показники ремонтпридатності визначаються у встановлених, заданих умовах (наявність запасних частин, необхідна чисельність і кваліфікація ремонтного персоналу, їхня нормативна оснащеність технічними засобами), то під час розв'язання задач другої групи використовують значення показників ремонтпридатності, які є результатом дії безлічі «практичних» чинників, більшість з яких не мають безпосереднього зв'язку з контролепридатністю, легкоз'ємністю та іншими властивостями власне ремонтпридатності. До числа таких чинників належать безвідмовність і довговічність обладнання рухомого складу, налагодженість системи матеріально-технічного забезпечення ремонтного виробництва, ступінь механізації праці ремонтників тощо. При цьому дані про фактичні витрати характеризують не стільки безпосередньо ремонтпридатність, скільки всю сукупність умов експлуатації, конструкційних параметрів рухомого складу, вікового «спектра» парку, нормативів напрацювання до ТО та ПР, регламентного складу ТО і ремонтів різного виду, ступеня дотримання нормативів тощо. Найважливішою умовою для успішного розв'язання задач другої групи є повнота і достовірність інформації, використовуваної для розрахунку показників ремонтпридатності.

Запитання до самоконтролю

1. Які роботи забезпечують технічно справний стан об'єкта в експлуатації?
2. У чому полягає сутність проблеми забезпечення ремонтпридатності конструкцій?
3. На яких етапах життєвого циклу об'єкта мають встановлюватися вимоги до ремонтпридатності?
4. Чому сучасна техніка не може обійтися без обслуговування та ремонту?
5. Які роботи входять до сукупності підтримання і відновлення працездатності?

6. Чим відрізняються профілактичні ремонти від випадкових?
7. Як ремонтпридатність впливає на експлуатаційні витрати і простої?
8. Який зв'язок існує між ремонтпридатністю, безвідмовністю та довговічністю?
9. Що таке коефіцієнт готовності і як він пов'язаний із ремонтпридатністю?
10. Коли закладається і коли проявляється властивість ремонтпридатності?
11. Які чинники впливають на кількісні характеристики ремонтпридатності?
12. Чому ремонтпридатністю можна і потрібно керувати?
13. Яку роль відіграє знання виду зв'язку між характеристиками ремонтпридатності і впливовими факторами?
14. Як у ДСТУ 2860-94 визначено ремонтпридатність?
15. Який англomовний термін відповідає поняттю ремонтпридатності і як його тлумачити?
16. У чому полягає тісний зв'язок технічного обслуговування і ремонту?
17. Які відмінності між ТО і ремонтом у контексті цілей, місця виконання та засобів?
18. Які операції можуть входити до обох систем – ТО і ремонту?
19. У чому полягає відмінність між поняттями «ремонт» і «ремонування» згідно з ДСТУ?
20. Який характер мають роботи під час технічного обслуговування?
21. Як визначається періодичність ТО?
22. Яка одиниця виміру періодичності ТО залежно від типу об'єкта?
23. Які види поточних ремонтів існують для тягового рухомого складу?
24. Як співвідносяться обсяги ремонтних операцій у ПР-1, ПР-2, ПР-3 і капітальних ремонтах?
25. У чому полягає відмінність між капітальними ремонтами КР-1, КР-2 і КРП?
26. Для чого виконується КРП і які операції до нього входять?
27. Які чинники визначають необхідність і періодичність конкретного виду ремонту?
28. Чому важливо враховувати зв'язок між періодичністю ТО, його обсягом і типом об'єкта?

29. Які два протилежні процеси впливають на технічний стан об'єкта в процесі експлуатації?

30. Яким чином процеси технічного обслуговування та ремонту впливають на працездатність об'єкта?

31. Як визначається технічний стан об'єкта в кожен момент часу експлуатації?

32. У чому полягає взаємозв'язок між зношуванням і відновленням конструкції?

33. На яких етапах життєвого циклу об'єкта має забезпечуватись ремонтпридатність?

34. Чому ремонтпридатність не може розглядатися ізольовано від інших властивостей технічного об'єкта?

35. Які чинники визначають ефективність реалізації властивості ремонтпридатності в експлуатації?

36. Чому ремонтпридатність розглядається як складова загальної якості технічного об'єкта?

37. Чому важливе встановлення єдиної термінології в галузі технічного обслуговування і ремонту?

38. Яке значення має нормування показників ремонтпридатності?

39. Для чого розробляють методи прогнозування ремонтпридатності?

40. Чим обґрунтовано необхідність методів оцінки ремонтпридатності на етапі проектування?

41. Які цілі переслідує планування випробувань для вивчення ремонтпридатності?

42. Для чого потрібна система збору та статистичного аналізу даних про ремонтпридатність?

43. Як класифікація машин і апаратів сприяє підвищенню ефективності обслуговування?

44. Яке значення має технічне оснащення підрозділів обслуговування та ремонту?

45. Що включає розробка прогресивних технологій відновлення конструкційних елементів?

46. Як пов'язана ремонтпридатність із системою забезпечення запасними частинами?

47. Чому важлива система зберігання, доставки та обліку запасних частин?

48. Яке значення мають методи визначення технічного стану об'єкта?

49. Чому державні та галузеві стандарти важливі для забезпечення ремонтопридатності?
50. Яка роль підготовки фахівців у системі забезпечення ремонтопридатності?
51. Чому вирішення проблеми ремонтопридатності потребує системного підходу?
52. Що означає застосування методів пошуку оптимальних рішень у цій сфері?
53. Які чинники необхідно враховувати при прийнятті рішень щодо ремонтопридатності?
54. Які групи чинників впливають на ремонтопридатність технічних об'єктів?
55. На які дві умовні групи поділяють чинники, що впливають на ремонтопридатність?
56. У чому полягає відмінність між керованими та некерованими чинниками?
57. Як конструкційні рішення, прийняті на етапі проектування, впливають на ремонтопридатність технічного об'єкта?
58. Які конструкційні чинники впливають на тривалість непрацездатного стану машини?
59. Наведіть приклади конструкційних факторів, які визначають витрати на технічне обслуговування та ремонт.
60. Які фактори впливають переважно на строки служби конструкційних елементів?
61. Яке значення має контрольопридатність для забезпечення ремонтопридатності?
62. Як забезпечується доступність конструкційних елементів для обслуговування в умовах обмеженого простору (на прикладі електровоза)?
63. Які основні методи досягнення точності під час виготовлення деталей і складальних одиниць?
64. Яку роль відіграє забезпечення властивостей поверхневого шару деталей?
65. Як впливають залишкові напруження після зварювання на ремонтопридатність конструкції?
66. Які організаційні форми технічного обслуговування і ремонту Вам відомі?
67. Які переваги й недоліки має агрегатний метод ремонту?
68. Чому неможливість обліку напрацювання складових елементів є проблемою при агрегатному методі ремонту?

69. Як впливає система забезпечення запасними частинами на ефективність ремонту?
70. Яке значення має експлуатаційно-технічна та ремонтна документація?
71. Які вимоги висуваються до технологічних процесів технічного обслуговування і ремонту?
72. Як технічна оснащеність впливає на якість і ефективність обслуговування?
73. Що таке ремонтпридатність і чому для її оцінки використовують імовірісно-статистичні методи?
74. Які основні вимоги мають задовольняти показники ремонтпридатності технічних об'єктів?
75. Які основні показники ремонтпридатності встановлені ДСТУ 2860-94?
76. Яку роль відіграють показники ремонтпридатності у практиці проектування, експлуатації та ремонту технічних об'єктів?
77. Як визначається імовірність відновлення працездатності об'єкта?
78. Яка математична залежність пов'язує функцію розподілу часу відновлення з імовірністю відновлення?
79. Які закони розподілу найчастіше використовуються для моделювання часу відновлення?
80. Як виглядає графік функцій $V(t)$ та $W(t)$ і що вони відображають?
81. Що характеризує середня тривалість відновлення?
82. Які чинники впливають на середню тривалість відновлення в депо?
83. Яка математична формула використовується для обчислення середньої тривалості відновлення?
84. Що таке дисперсія часу відновлення і як вона обчислюється?
85. Що таке інтенсивність відновлення і в чому її відмінність від середньої тривалості?
86. Як обчислюється інтенсивність відновлення на основі функцій $V(t)$ та $W(t)$?
87. Який статистичний підхід застосовується для оцінки інтенсивності відновлення?
88. Що таке гамма-відсоткова тривалість відновлення і коли її доцільно використовувати?
89. Як визначається середня інтенсивність відновлення?

90. Як оцінюється середня трудомісткість технічного обслуговування або ремонту?
91. У яких одиницях виражається трудомісткість?
92. Як пов'язані між собою функції імовірності відновлення, інтенсивності та часу відновлення?
93. Чому важливо враховувати ці взаємозв'язки при плануванні експлуатації рухомого складу?
94. Які техніко-економічні показники ремонтопридатності встановлені для рухомого складу?
95. Що таке питома сумарна тривалість та вартість ремонтів і як вони розраховуються?
96. Яке практичне значення мають показники, пов'язані з наробітком?
97. У яких двох основних групах задач використовуються показники ремонтопридатності?
98. Як проводяться випробування на ремонтопридатність у депо?
99. Які чинники впливають на показники ремонтопридатності під час експлуатації?
100. Які вимоги до інформації для оцінки ремонтопридатності в умовах експлуатації?

Збережуваність і довговічність технічних об'єктів

7.1. Показники збережуваності

За ДСТУ 2860-94 *збережуваність*¹ – це властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, під час і після зберігання та (чи) транспортування.

На відміну від безвідмовності, під час розгляду якої враховуються тільки ті періоди часу, коли об'єкт перебуває в експлуатації, тобто використовується за призначенням, під час вивчення збережуваності розглядаються періоди часу, протягом яких об'єкт не використовується. Наприклад, для одиниці рухомого складу це відстій через нерівномірність руху, відстій у резерві управління залізниці або в запасі АТ «Укрзалізниця», транспортування в холодному стані до місця проведення ремонту (в інше депо або на ремонтний завод) або транспортування до депо приписки після виготовлення чи ремонту на заводі або в іншому депо.

Перебуваючи в стані вимушеної перерви в роботі, одиниця рухомого складу повинна мати здатність негайно знову включитися в роботу, якщо тільки в цьому виникає необхідність. Якщо ж, перебуваючи в неробочому стані, одиниця рухомого складу зазнає таких змін контрольованих параметрів, які не дають їй змоги негайно ввімкнутися в роботу,

¹ В Міжнародному стандарті ІЕС 50 (191) не включається в поняття «надійність» і взагалі не розглядається та не термінується у згаданому стандарті властивість «збережуваність». В Глосарії ЕОКК (EOQC Glossary-Bern, 1988) «надійність» розглядається як збірний термін, який використовується для не кількісного опису властивостей безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та безвідмовності при зберіганні та транспортуванні. Слід зауважити, що зміст терміну «збережуваність» в ДСТУ 2860-94 є більш «жорстким» в порівнянні з визначенням в Глосарії ЕОКК, тому що він розуміє збереження визначень показників безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності як на протязі, так і після зберігання та (чи) транспортування.

або після ввімкнення в неї одиниця рухомого складу швидко відмовляє, то її збереженість не відповідає вимогам, які ставлять перед неї.

ДСТУ 2860-94 визначає два показника збережуваності – середній термін збережуваності та гамма-відсотковий термін збережуваності.

Середній термін збережуваності – це математичне сподівання строку збережуваності

Гамма-відсотковий термін збережуваності – це термін збережуваності, що його досягає об’єкт із заданою імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Кількісною мірою цієї властивості є термін збережуваності, тобто календарна тривалість зберігання і (або) транспортування об’єкта, протягом якої зберігається його працездатний стан, інакше кажучи, зберігаються в установлених межах значення параметрів, що характеризують здатність об’єкта виконувати задані функції. Термін збереженості, як і інші часові характеристики надійності, є випадковою величиною, найповнішою характеристикою якої слугує закон її розподілу.

Однак термін збережуваності має ту особливість, що в реальних умовах установити закон його розподілу практично неможливо, тому що невідомі моменти виникнення відмов технічних об’єктів, що перебувають у режимі зберігання і (або) транспортування. Для того щоб зафіксувати ці моменти, необхідно в період зберігання об’єкта безперервно контролювати всі параметри, що характеризують його працездатність. Здійснити це практично неможливо, оскільки багато параметрів можна виміряти тільки під час роботи технічного об’єкта. Тому єдиним показником збережуваності технічного об’єкта, що має практичне значення, є гамма-відсотковий (γ %-вий) термін збережуваності, що досягається об’єктом із заданою імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Наприклад, на зберігання поклали 1000 деталей. Через 500 год перевірили їхній стан, при цьому 100 деталей виявилися непрацездатними. Моменти виникнення відмов цих деталей невідомі, тобто відмова будь-якої деталі могла статися як у перші, так і в останні години зберігання, а також у момент їх включення до експлуатації.

Розв’язання. Позначимо: N – кількість об’єктів, що перебувають на зберіганні; $n(t_3)$ – кількість об’єктів, що зберегли працездатний стан протягом терміну зберігання t_3 . Оцінка імовірності збереження працездатного стану протягом терміну зберігання t_3 дорівнює:

$$\gamma^c = \frac{n(t_3)}{N}.$$

У розглянутому прикладі $N = 1000$, $n(t_3) = 900$, $t_3 = 500$ год, тоді

$$\gamma^c = \frac{900}{1000} = 0,9 \text{ або } 90 \ \%.$$

Таким чином, 500 год – це 90 %-вий термін збережуваності, $t_{3\ 90\ \%} = 500$ год.

Під час зберігання і транспортування рухомого складу причини, що зумовлюють виникнення відмов, пов'язані зазвичай із впливом навколишнього середовища і часу. Цей вплив може призводити до відмов тих чи інших систем унаслідок корозії металевих поверхонь елементів і процесу старіння гумових, синтетичних деталей, їхнього висихання і розшарування. Для виключення подібних неприємностей у депо повинні передбачатися і своєчасно проводитися різного роду регламентні роботи та перевірки, а також відновлювальні роботи у разі виявлення тих чи інших відхилень.

7.2. Кількісні показники довговічності

В Міжнародному стандарті ІЕС 50 (191) «надійність» розглядається як збірний термін, який використовується для не кількісного відображення властивостей безвідмовності, ремонтпридатності та забезпечення технічного обслуговування та ремонту. При цьому властивість «довговічність» розглядається окремо та не включається в поняття «надійність». Відповідно до цього стандарту *довговічність* (durability) – це здатність об'єкта виконувати необхідні функції до моменту, коли його подальше використання стає неможливим або недоцільним через старіння, зношування чи інші фактори.

Відповідно до ДСТУ 2860-94 *довговічність* – це властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний¹ стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

При досягненні граничного стану одиницю рухомого складу або будь-який її агрегат списують, виключають з інвентарю. За чинним положенням локомотив виключають з інвентарю в разі пошкодження в

¹ Граничний стан – стан об'єкта, за якого його подальша експлуатація неприпустима або недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне.

такому обсязі, що вартість відновлення перевищує 60 % первісної вартості, і в разі неможливості відновлення рами кузова. Виключенню підлягають також морально застарілі серії рухомого складу, експлуатація, ремонт або модернізація яких економічно недоцільні.

Крім остаточного граничного стану, при досягненні якого одиниця рухомого складу виключається з інвентарного парку, існують так звані проміжні граничні стани, що викликають необхідність проведення планового, поточного або капітального ремонту.

Для різних агрегатів рухомого складу також існує остаточний граничний стан, після досягнення якого агрегат виключають з інвентарю, і проміжні граничні стани, за яких проводяться ті чи інші ремонтно-відновлювальні роботи. Наприклад, для колісної пари проміжними граничними станами будуть необхідність обточування або заміни бандажа, для тягових двигунів – проведення просочення ізоляції або її заміни, для електричних апаратів – заміна контактуючих елементів, дугогасильної камери або приводного механізму тощо.

Довговічність, так само як і безвідмовність – це властивість об'єкта зберігати працездатний стан. Однак безвідмовність характеризує надійність об'єкта на досить *нетривалих інтервалах напрацювання*, протягом яких об'єкт працює *безперервно*. Наприклад, для локомотива це, як правило, інтервали між плановими ремонтами. Довговічність – це властивість *тривалий* час зберігати працездатний стан *із можливими перервами* для проведення технічного обслуговування та ремонтів.

Часовою характеристикою довговічності є тривалість роботи об'єкта від моменту введення в експлуатацію до моменту досягнення граничного стану. Ця тривалість характеризується двома випадковими величинами – ресурсом і терміном служби.

Ресурс – сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан, тобто під час визначення ресурсу з тривалості періоду від введення в експлуатацію до переходу в граничний стан вилучають усі періоди, у яких об'єкт не використовують за призначенням. Наприклад, для локомотива або його агрегатів такими є періоди перебування локомотива у відстої через нерівномірність руху, знаходження у непланових ремонтах, у резерві управління залізниці або в запасі АТ «Укрзалізниця». Під час визначення ресурсу до капітального ремонту виключаються також періоди перебування локомотива на планових поточних ремонтах, а під час визначення повного ресурсу (до списання) виключаються також періоди перебування локомотива на капітальних ремонтах. Це здійснюється автоматично, якщо величину ресурсу локомотива або

його агрегатів вимірювати в кілометрах лінійного пробігу, які відображають тільки «чистий» час роботи локомотива.

Залежно від розглянутого граничного стану для локомотива визначають ресурс до поточного ремонту того чи іншого виду (ПР-1, ПР-2 або ПР-3), до капітальних ремонтів (КР-1, КР-2), а також повний ресурс (до списання).

Для різних агрегатів рухомого складу розглядають також ресурс до проведення ремонтних робіт певного виду. Наприклад, ресурс до обточування або до заміни бандажів колісних пар, ресурс до просочення ізоляції тягових двигунів тощо.

Термін служби – календарна тривалість експлуатації об'єкта від моменту її початку або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Термін служби на відміну від ресурсу містить у собі всі періоди вимушеного простою рухомого складу.

Як і будь-яка інша випадкова величина, ресурс r і термін служби $t_{\text{сл}}$ повністю описуються законом розподілу, який задають в інтегральній формі – у вигляді функції розподілу ресурсу $F(r)$ або терміну служби $F_{\text{сл}}(t)$, а також у диференціальній формі – у вигляді густини розподілу ресурсу $f(r) = F'(r)$ або терміну служби $f_{\text{сл}}(t) = F'_{\text{сл}}(t)$.

На практиці зазвичай визначають деякі числові характеристики цих розподілів. Так, ДСТУ 2860-94 встановлено такі показники довговічності:

– *середній ресурс* R – математичне сподівання ресурсу

$$R = \int_0^{\infty} r f(r) dr. \quad (7.1)$$

За наявності статистичної інформації про величини ресурсів певних технічних об'єктів, наприклад дизелів, тягових електричних двигунів локомотивів, одиниць рухомого складу, величина їхнього середнього ресурсу визначається як

$$R^c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_{pi}, \quad (7.2)$$

де l_{pi} – вибіркові значення ресурсів об'єкта спостережень;

N – кількість спостережуваних об'єктів або обсяг вибірки.

– *гамма-відсотковий ресурс* r_γ – сумарний наробіток, протягом якої об’єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , виражений у відсотках (рис. 7.1).

Гамма-відсотковий ресурс визначається з рівняння

$$\gamma = \int_{r_\gamma}^{\infty} f(r) dr; \quad (7.3)$$

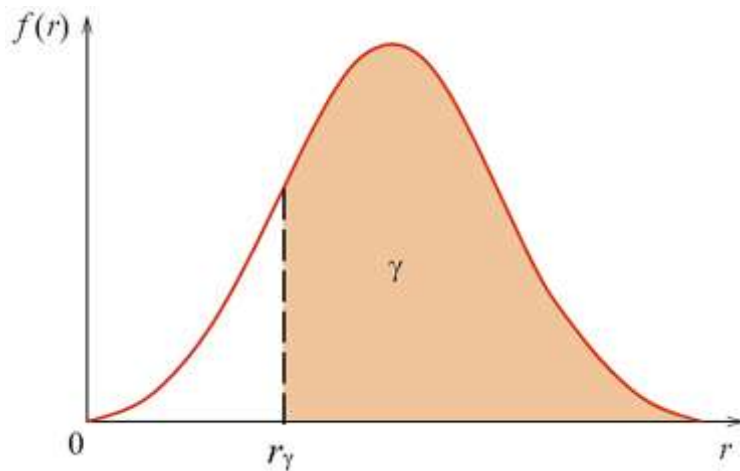


Рис. 7.1. Схема визначення гамма-відсоткового ресурсу

– *середній термін служби* – математичне сподівання терміну служби

$$T_{\text{сл}} = \int_0^{\infty} t f_{\text{сл}}(t) dt; \quad (7.4)$$

– *гамма-відсотковий термін служби* – календарна тривалість експлуатації, протягом якої об’єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , вираженою у відсотках

$$\gamma = \int_{t_\gamma}^{\infty} f_{\text{сл}}(t) dt. \quad (7.5)$$

При використанні показників довговічності слід вказувати початок відліку та вид дії після настання граничного стану, наприклад, гамма-відсотковий ресурс від другого капітального ремонту до списання. Показники довговічності, відлік яких здійснюється від введення об’єкта в експлуатацію до повного зняття з експлуатації, називаються: середній повний ресурс (термін служби), гамма-відсотковий повний ресурс (термін служби).

Також галузевою нормативною документацією можуть бути введені такі показники:

– *пробіги між технічними обслуговуваннями та ремонтами*, під час яких вони піддаються ремонту, регулюванню, контролю технічно-

го стану. При цьому необхідно розрізняти нормативні значення, встановлені нормативно-технічною документацією, і фактичні значення, які визначають за статистичними даними депо і залізниць у конкретних умовах експлуатації;

– *призначений ресурс*, що являє собою сумарне напрацювання одиниці рухомого складу (вузла, деталі), після досягнення якого експлуатацію має бути припинено (незалежно від його технічного стану) для проведення планових технічних обслуговувань і ремонтів або списання. Метою встановлення призначеного ресурсу є забезпечення обов'язкового завчасного припинення застосування одиниці рухомого складу за призначенням, виходячи з вимог безпеки або техніко-економічних міркувань;

– *гарантійний термін служби одиниці рухомого складу* – це термін служби, протягом якого заводи гарантують справність одиниці рухомого складу та несуть матеріальну відповідальність за несправності, що виникли, при дотриманні технічних умов експлуатації.

У разі використання показників довговічності слід зазначати початок відліку та вид дій після настання граничного стану (наприклад, гамма-відсотковий ресурс від другого капітального ремонту до списання).

Показники довговічності, що відлічуються від введення об'єкта в експлуатацію до остаточного зняття з експлуатації, називаються гамма-відсотковим повним ресурсом (терміном служби), середнім повним ресурсом (терміном служби).

Приклад 7.1. Ресурс до заміни бандажа колісної пари має нормальний розподіл із параметрами $R = 400$ тис. км, $\sigma_r = 20$ тис. км. Розрахувати функцію розподілу ресурсу та імовірність відсутності заміни бандажа з кроком $0,5\sigma_r$. Визначити величину 90 %-ного ресурсу бандажа.

Розв'язання. Густина розподілу ресурсу за нормального закону розподілу має вигляд

$$f(r) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(r-R)^2}{2\sigma_r^2}}.$$

Розрахункові значення функції $f(r)$ з кроком $0,5\sigma_r = 10$ тис. км наведено в табл. 7.1, починаючи з $r = R - 3\sigma_r = 340$ тис. км.

Функція розподілу ресурсу знаходиться за формулою:

$$F(r) = \int_0^r f(r) dr.$$

Таблиця 7.1

Результати розрахунку

№ з/П	r , тис. км	$f(r) \cdot 10^{-4}$, тис. км ⁻¹	$F(r)$	$P(r)$
0	340	2,22	0	1,0
1	350	8,78	0,0055	0,9945
2	360	27	0,0234	0,9766
3	370	64,9	0,0693	0,931
4	380	121	0,1621	0,8379
5	390	176	0,3106	0,6894
6	400	200	0,5	0,5
7	410	176	0,69	0,31
8	420	121	0,84	0,16
9	430	64,9	0,93	0,07
10	440	27	0,977	0,023
11	450	8,78	0,9945	0,0055
12	460	2,22	1,0	0

Інтегрування здійснюється чисельним методом за формулою трапецій

$$F_j = \sum_{i=1}^j \frac{f_{i-1} + f_i}{2} \cdot \Delta r.$$

Наприклад:

$$F_1 = \frac{2,22 + 8,78}{2} \cdot 10^{-4} \cdot 10\,000 = 0,0055;$$

$$F_2 = 0,0055 + \frac{8,78 + 27}{2} \cdot 10^{-4} \cdot 10\,000 = 0,0234;$$

$$F_3 = 0,0234 + \frac{27 + 64,9}{2} \cdot 10^{-4} \cdot 10\,000 = 0,0693.$$

Далі аналогічно. Імовірність відсутності заміни бандажа знаходиться за формулою:

$$P(r) = 1 - F(r) \text{ або } P_i = 1 - F_i.$$

Результати розрахунку наведено в табл. 7.1 у стовпчиках $F(r)$ і $P(r)$.

З даних табл. 7.1 зрозуміло, що бандаж не досягає граничного стану з імовірністю $P(r) = 0,931$ за наробіток $r = 370$ тис. км і з імовірністю $P(r) = 0,8379$ за наробіток $r = 380$ тис. км.

Таким чином, бандаж не досягає граничного стану з імовірністю $P(r) = 0,9$ при наробітку між 370 і 380 тис. км, тобто приблизно 375 тис. км.

Точніше величину 90 %-ного ресурсу можна знайти таким чином.

В додатках до підручників з теорії імовірності знаходимо значення нормованої та центрованої випадкової величини, розподіленої за нормальним законом, що відповідає $F(x) = 0,1$. Вона дорівнює $-1,28$. Таким чином:

$$\frac{r_{90\%} - R}{\sigma_r} = -1,28 \quad \text{або} \quad \frac{r_{90\%} - 400}{20} = -1,28.$$

Звідси $r_{90\%} = 374,4$ тис. км.

Запитання до самоконтролю

1. Що таке збережуваність технічного об'єкта згідно з ДСТУ 2860-94?
2. Чим збережуваність відрізняється від безвідмовності?
3. У яких випадках для рухомого складу особливо важливою є збережуваність?
4. Що відбувається, якщо одиниця рухомого складу після зберігання не може одразу включитися в роботу?
5. Які показники збережуваності визначає ДСТУ 2860-94?
6. Як визначається середній термін збережуваності?
7. Що таке гамма-відсотковий термін збережуваності і як його оцінюють?
8. Чому в реальних умовах складно визначити закон розподілу терміну збережуваності?
9. Які чинники впливають на працездатність технічного об'єкта під час зберігання або транспортування?

10. Які регламентні роботи слід проводити в депо для забезпечення збережуваності рухомого складу?
11. У чому полягає практичне значення γ -відсоткового терміну збережуваності?
12. Як обчислюється імовірність збереження працездатного стану об'єкта протягом певного часу?
13. Наведіть приклад оцінки гамма-відсоткового терміну збережуваності на основі кількості об'єктів, що зберегли працездатність.
14. Які матеріали і деталі рухомого складу найбільш вразливі до впливу навколишнього середовища під час зберігання?
15. Чому вимірювання параметрів працездатності під час зберігання є технічно складним?
16. Як у Міжнародному стандарті ІЕС 50 (191) трактується поняття «довговічність» і чим воно відрізняється від поняття «надійність»?
17. Яке визначення довговічності надається в ДСТУ 2860-94?
18. Що розуміють під граничним станом технічного об'єкта?
19. У яких випадках локомотив виключається з інвентарю згідно з чинним положенням?
20. Що таке проміжні граничні стани і які приклади таких станів можна навести для агрегатів рухомого складу?
21. Чим довговічність відрізняється від безвідмовності?
22. Яка різниця між ресурсом і терміном служби об'єкта?
23. Як обчислюється ресурс технічного об'єкта, зокрема локомотива, і які періоди не враховуються при цьому?
24. Які види ресурсу виділяють для локомотива залежно від виду граничного стану?
25. Як визначається середній ресурс технічного об'єкта за статистичними даними?
26. Що таке гамма-відсотковий ресурс і як його обчислюють?
27. Як визначається середній термін служби технічного об'єкта?
28. У чому полягає відмінність між повним ресурсом (терміном служби) і частковим?
29. Які показники довговічності можуть бути введені галузевими нормативними документами?
30. Що таке призначений ресурс і з якою метою він встановлюється?
31. Що розуміють під гарантійним терміном служби одиниці рухомого складу?

32. Як використовується нормальний розподіл для визначення ресурсу до заміни бандажа колісної пари?
33. Як за допомогою таблиці функції розподілу можна оцінити 90 %-ний ресурс?
34. Які етапи чисельного інтегрування використовуються для обчислення функції розподілу ресурсу?
35. Чому важливо вказувати початок відліку та дії після досягнення граничного стану при визначенні показників довговічності?

Комплексні показники надійності

8.1. Визначення комплексних показників за статистичними даними

Комплексні показники характеризують кілька властивостей, із тих, які в сукупності складають надійність об'єкта. Комплексні показники надійності рухомого складу у більшості випадків характеризують одночасно властивості безвідмовності та ремонтпридатності.

Типовий цикл роботи одиниці рухомого складу між поточними ремонтами містить у собі тільки періоди корисної роботи $t_{ек}$ і періоди очікування роботи $t_{оч}$, тобто передбачається, що в міжремонтний період одиниця рухомого складу має працювати безвідмовно (рис. 8.1). Але на практиці так часто не виходить, оскільки одиниця рухомого складу унаслідок відмови може опинитися в непрацездатному стані і для відновлення її працездатності потрібне проведення непланового ремонту. А це – додаткові втрати часу, які ремонтним циклом не передбачено (на рис. 8.1 показано пунктиром). Співвідношення цих часів і визначає значення багатьох комплексних показників.

Державним стандартом ДСТУ 2860-94 встановлено наступні комплексні показники надійності.

Коефіцієнт готовності – це імовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено. Тому під час розрахунку цього показника для одиниці рухомого складу, у межах ремонтного циклу, враховується тільки час її корисної роботи та час відновлення після відмови і не враховується час простою в очікуванні роботи, згідно з рис. 8.1

$$K_r = \frac{\sum t_{ек_i}}{\sum t_{ек_i} + \sum T_{в_i}}. \quad (8.1)$$

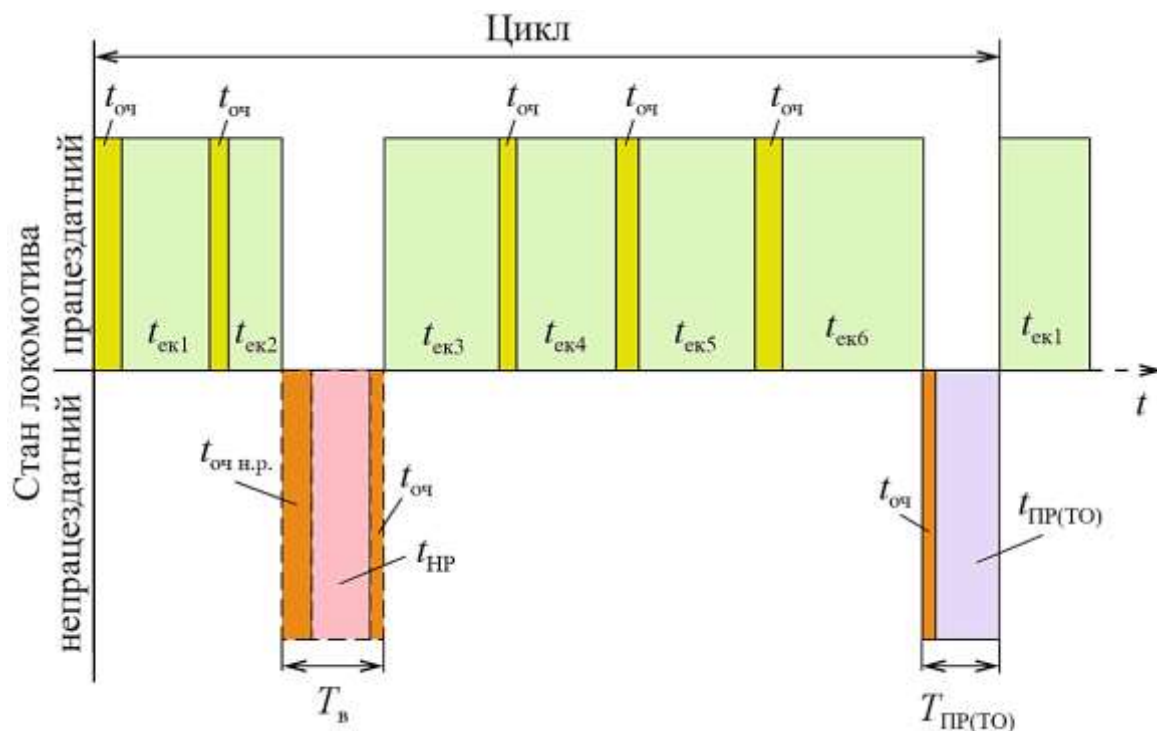


Рис. 7.1. Діаграма тривалості перебування одиниці рухомого складу в працездатному і непрацездатному станах протягом ремонтного циклу:
 $t_{ек}$ – час в експлуатації (час використання за призначенням); $t_{оч}$ – час очікування роботи; $t_{оч \text{ н.р.}}$ – час очікування ремонту після відмови (час очікування непланового ремонту); $t_{НР}$ – час виконання непланового ремонту; $T_в$ – час відновлення працездатності після відмови; $t_{ПР(ТО)}$ – час виконання поточного ремонту або технічного обслуговування; $T_{ПР(ТО)}$ – час простою в поточному ремонті або технічному обслуговуванні з врахуванням часу на очікування його виконання

Таким чином, коефіцієнт готовності являє собою відношення сумарного часу безвідмовної роботи одиниці рухомого складу до суми часу безвідмовної роботи і сумарного часу відновлення її працездатності після відмов у межах ремонтного циклу, який розглядається. У якості ремонтних циклів можна приймати час роботи одиниці рухомого складу між ТО-3, ПР-1, ПР-2 тощо. За величиною коефіцієнта готовності можна оцінити якість виконуваних планових видів ремонту.

Величина коефіцієнта готовності може бути підвищена за рахунок збільшення напрацювання на відмову та зменшення середнього часу відновлення. Для визначення коефіцієнта готовності необхідний досить тривалий календарний термін функціонування об'єкта. Тому що коефіцієнт готовності залежить від часу відновлення це утрудняє оцінку надійності об'єкта і по величині коефіцієнта готовності не можна судити про час безупинної роботи до відмови. Наприклад, для того са-

мого чисельного значення коефіцієнту готовності можна мати малі інтервали використання за призначенням і відновлення працездатності та значно великі.

Коефіцієнт готовності є зручною характеристикою для об'єктів, що призначені для тривалого функціонування, і не вирішують поставлену задачу протягом малого проміжку часу, в інший час знаходячись у режимі очікування, (наприклад – релейний захист, контрольна апаратура). Для таких випадків використовують коефіцієнт оперативної готовності.

Коефіцієнт оперативної готовності – імовірність того, що за винятком тих запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено, він у довільний момент часу виявиться у працездатному стані і надалі протягом заданого інтервалу часу. Визначається за формулою:

$$K_{ог} = K_{г} \cdot P(t_p), \quad (8.2)$$

де $P(t_p)$ – імовірність безвідмовної роботи об'єкта протягом часу t_p , необхідного дня безвідмовного використання за призначенням.

Для часто використовуваного у практиці найпростішого потоку відмов, коли $\lambda = \omega$

$$P(t_p) = e^{-\lambda \cdot t_p} = e^{-\frac{1}{T_o} t_p}. \quad (8.3)$$

Коефіцієнт технічного використання – це відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта у працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані та у простоях, зумовлених технічним, обслуговуванням і ремонтом за той самий період. Тобто оцінку надійності рухомого складу з урахуванням часу на проведення планових операцій технічного обслуговування і поточних ремонтів виконують за допомогою коефіцієнта технічного використання. Згідно з рис. 8.1

$$K_{тв} = \frac{\sum t_{ек_i}}{\sum t_{ек_i} + \sum T_{в_i} + \sum t_{ТО_i} + \sum t_{ПП_i}}. \quad (8.4)$$

Коефіцієнт технічного використання на відміну від коефіцієнту готовності може розраховуватися не тільки в межах ремонтного циклу роботи одиниці рухомого складу, а й за будь-який проміжок часу її роботи.

Приклад 8.1. Необхідно розрахувати коефіцієнт технічного використання локомотивного парку депо, що складається з 65 локомотивів. Час справної роботи локомотивів за розглянутий період склав $\sum t_{ек_i} = 473 \cdot 10^3$ год. Кількість непланових ремонтів локомотивів за цей же період роботи склала 283. Середній час відновлення працездатності на одному неплановому ремонті – 16,5 год.

Кількість і час простою локомотивів у планових технологічних операціях протягом розглянутого періоду експлуатації наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Види, кількість і час простою локомотивів у планових технологічних операціях протягом року

Вид ТО (ПР)	Кількість	Середній час простою, год
ТО-3	17181	1,3
ПР-1	1672	6,5
ПР-2	173,5	35,8
ПР-3	47,5	133
КР-1	22	196
КР-2	14	1448

Розв'язання. Відповідно до формули (8.4)

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{473 \cdot 10^3}{473 \cdot 10^3 + 283 \cdot 16,5 + 17181 \cdot 1,3 + \dots + 14 \cdot 1448} \approx 0,86.$$

Про що ж свідчить отримана величина коефіцієнта технічного використання локомотивів? Помножимо $K_{\text{ТВ}}$ на кількість локомотивів парку $0,86 \cdot 65 = 55,9 \approx 56$. Таким чином, протягом розглянутого періоду експлуатації в будь-який момент часу тільки 56 локомотивів із 65 виконують корисну роботу, а дев'ять локомотивів постійно перебувають у планових ТО, ПР, КР або відновлюють працездатність після відмов.

Коефіцієнт неготовності (коефіцієнт простою) – імовірність того, що об’єкт виявиться непрацездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об’єкта за призначенням не передбачено. Визначається за формулою:

$$K_{\text{нг}} = \frac{\sum T_{\text{в}_i}}{\sum t_{\text{ек}_i} + \sum T_{\text{в}_i}} = 1 - K_{\text{г}}. \quad (8.5)$$

Середній коефіцієнт готовності – середнє значення нестационарного коефіцієнта готовності у заданому інтервалі часу.

Стаціонарний коефіцієнт готовності – значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об’єкта, коли середній параметр потоку відмов і середня тривалість відновлення залишаються сталими.

Галузевими стандартами може буде введені такі комплексні показники.

Коефіцієнт збереження ефективності – це відношення значення показника ефективності використання об’єкта за призначенням за певну тривалість експлуатації до номінального значення цього показника, обчисленого за умови, що відмови об’єкта протягом того самого періоду не виникають.

Коефіцієнт витрат на технічне обслуговування і ремонт відображає відношення річних сумарних витрат на технічне обслуговування і ремонт $E_{\text{ТОРр}}$ (у розрахунку на один локомотив) до первісної ціни Π (собівартості виробництва) локомотива

$$K_{\text{ТОР}} = \frac{E_{\text{ТОРр}}}{\Pi}. \quad (8.6)$$

Для характеристики витрат на відновлення працездатності, віднесених до одиниці обсягу виконаної перевізної роботи, можна використовувать ремонтність

$$R = \frac{E_{\text{ТОРр}}}{\sum QL}, \quad (8.7)$$

де $\sum QL$ – обсяг перевізної роботи, виконаної парком депо за рік у розрахунку на один локомотив.

Наведені вище комплексні показники надійності визначають: за плановими (проектними) і фактичними даними, отриманими в результаті експлуатації рухомого складу; за одиницею рухомого складу загалом і окремими її вузлами, агрегатами; у функції часу експлуатації, пробігу або виконаної перевізної роботи в тонно-кілометрах бруто.

8.2. Основи теорії марковських процесів

Під час визначення комплексних показників розглядають не один стан об'єкта, наприклад працездатний або непрацездатний, а аналізують процес переходу об'єкта з одного стану в інший, причому процес цей – випадковий, тобто переходи здійснюють із певними імовірностями. Математичним апаратом для опису функціонування таких об'єктів є теорія марковських процесів.

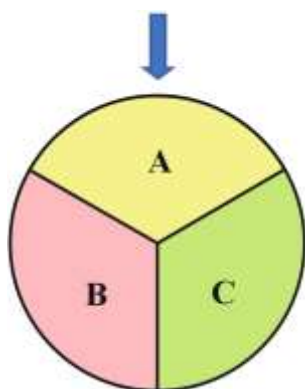


Рис. 8.2. Система для моделювання марковського процесу

Марковським називається такий процес переходу об'єкта або системи з одного стану в інший, у якому імовірності переходу залежать від того, між якими станами здійснюється перехід, і не залежать від того, яким чином розглянута система потрапила в той стан, з якого здійснюється перехід. Останню властивість називають відсутністю післядії, або відсутністю «пам'яті» у розглядуваного процесу.

Алгоритм аналізу марковського процесу розглянемо на прикладі системи (рис. 8.2), що складається з диска, поділеного на три сектори А, В і С, і стрілки-показчика.

Розглянута система може перебувати в трьох станах:

- 1 – навпроти показчика розташований сектор А;
- 2 – навпроти показчика розташований сектор В;
- 3 – навпроти показчика розташований сектор С.

Перехід (переведення) системи з одного стану до іншого здійснюється за допомогою наступного імовірнісного механізму:

– якщо система перебуває у стані 1, то стан, у який вона перейде, визначається шляхом кидання монети. Якщо монета випадає дотори

гербом, то система переходить у стан 2 (під покажчик переводиться сектор В), якщо ж монета випадає догори цифрою, то в стан 3.

Позначимо P_{ij} – імовірність переходу зі стану з номером i в стан із номером j . Очевидно, що в розглянутій ситуації $P_{11} = 0$, $P_{12} = 0,5$, $P_{13} = 0,5$.

– якщо система перебуває в стані 2, то стан, у який вона буде переведена, визначається шляхом кидання гральної кістки. Якщо випадає непарне число 1, 3 або 5, то система переходить у стан 1; якщо випадає цифра 2, то система залишається у 2-му стані; якщо випадають цифри 4 або 6, то система переходить у стан 3. У цій ситуації імовірності переходів будуть такі $P_{21} = 0,5$, $P_{22} = 1/6$, $P_{23} = 1/3$.

– якщо система перебуває у стані 3, то наступний стан визначається шляхом кидання двох монет.

Якщо одна монета випадає догори гербом, а інша цифрою (такому результату випробувань сприяють два варіанти: 1-ша монета випадає догори гербом, 2-га – цифрою, і навпаки), то система переходить у стан 1; якщо обидві монети випадають догори гербом, то система переходить у стан 2; якщо обидві монети випадають догори цифрою, то система перебуває (залишається) у стані 3.

Нескладно підрахувати, що $P_{31} = 0,5$, $P_{32} = 0,25$, $P_{33} = 0,25$.

Імовірності переходів системи з одного стану в інший зручно подавати у вигляді квадратної матриці, у якій кількість рядків і стовпчиків дорівнює числу станів системи, номери рядків – номери станів, з яких система «уходить», а номери стовпчиків – у які вона переходить, на перетині i -го рядка та j -го стовпчика записують імовірність P_{ij} . У розглянутому прикладі матриця імовірностей переходів має вигляд:

$$P_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{ccc} 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 1/6 & 1/3 \\ 0,5 & 0,25 & 0,25 \end{array} \right\| \end{matrix}.$$

Сума імовірностей, що стоять в одному рядку, дорівнює 1, тобто $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$), де n – кількість станів системи.

Більш наочний вигляд має представлення марковського процесу у вигляді графа переходів, у якому вершини – це стани системи, стрілки

– напрямки переходів, а біля кожної стрілки зазначається імовірність відповідного переходу (рис. 8.3).

Для розглянутого прикладу граф переходів має такий вигляд. Завдання марковського процесу у вигляді матриці імовірностей переходів або у вигляді графа переходів є рівносильними, тобто якщо задано матрицю, то за нею легко побудувати граф переходів і, навпаки. Для того щоб марковський процес був повністю визначений, крім матриці імовірностей (графа) переходів, необхідно задати початкову умову, тобто вказати імовірності, з якими розглянута система перебувала в кожному зі станів на нульовому кроці процесу, де під кроком розуміють один перехід системи зі стану i у стан j , зокрема й у випадку, коли $i=j$.

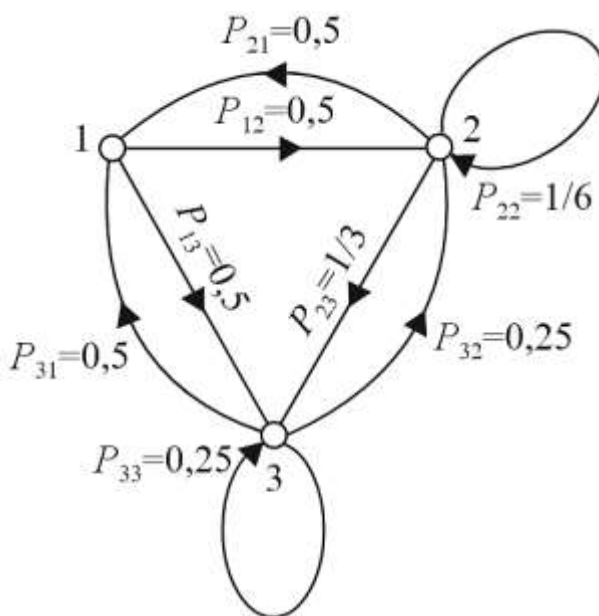


Рис. 8.3. Граф переходів

Зазвичай на нульовому кроці фіксують один зі станів, тобто його імовірність вважають рівною 1, а імовірності всіх інших станів дорівнюють 0.

Позначимо $P_i(k)$ – імовірність того, що система, яку розглядають, перебуває в стані i на k -му кроці процесу.

Початкові умови задають у вигляді вектора-рядка, компонентами якого є імовірності $P_i(0)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Для розглянутого прикладу початкові умови задають у такий спосіб:

- а) $\bar{P}(0) = \langle 1; 0; 0 \rangle$ – система перебуває у стані 1;
- б) $\bar{P}(0) = \langle 0; 1; 0 \rangle$ – система перебуває у стані 2;
- в) $\bar{P}(0) = \langle 0; 0; 1 \rangle$ – система перебуває у стані 3.

Якщо відомі матриця імовірностей або граф переходів і задано вектор розподілу імовірностей $\bar{P}_i(0)$ (початкові умови), то можна розрахувати імовірності, з якими система перебуватиме в одному зі станів на будь-якому кроці процесу.

Для розглядуваного прикладу оберемо початкові умови а), тобто $\bar{P}_i(0) = \langle 1; 0; 0 \rangle$ і розрахуємо $P_i(k)$ для $i = 1, 2, 3$ і $k = 1, 2, 3, 4, \dots, n$.

Система опиниться у стані 1 на першому кроці процесу ($k = 1$), якщо вона перебувала в цьому стані на нульовому кроці й залишилася в ньому, або вона перебувала у 2-му стані на нульовому кроці та перейшла з 2-го стану в перший, або вона перебувала у 3-му стані та перейшла з нього в 1-й стан.

Імовірність того, що система перебуватиме в 1-му стані на 1-му кроці процесу, можна знайти як імовірність складної події за теоремами множення і додавання імовірностей:

$$P_1(1) = P_1(0)P_{11} + P_2(0)P_{21} + P_3(0)P_{31} = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0,5 = 0.$$

Аналогічно знаходяться імовірності того, що на 1-му кроці система перебуватиме у 2-му або 3-му стані:

$$P_2(1) = P_1(0)P_{12} + P_2(0)P_{22} + P_3(0)P_{32} = 1 \cdot 0,5 + 0 \cdot 1/6 + 0 \cdot 0,25 = 0,5;$$

$$P_3(1) = P_1(0)P_{13} + P_2(0)P_{23} + P_3(0)P_{33} = 1 \cdot 0,5 + 0 \cdot 1/3 + 0 \cdot 0,25 = 0,5.$$

Розподіл імовірностей станів системи на першому кроці процесу ($k = 1$) представимо у вигляді вектора-рядка: $\bar{P}_i(1) = \langle 0; 0,5; 0,5 \rangle$.

Знаючи розподіли імовірностей станів системи на першому кроці, можна розрахувати імовірності станів на 2-му кроці, а знаючи їх, можна розрахувати імовірності станів на 3-му кроці тощо.

Імовірності станів системи на 2-му кроці:

$$P_1(2) = P_1(1)P_{11} + P_2(1)P_{21} + P_3(1)P_{31} = 0 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,5 = 0,5;$$

$$P_2(2) = P_1(1)P_{12} + P_2(1)P_{22} + P_3(1)P_{32} = 0 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 1/6 + 0,5 \cdot 0,25 = 0,208;$$

$$P_3(2) = P_1(1)P_{13} + P_2(1)P_{23} + P_3(1)P_{33} = 0 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 1/3 + 0,5 \cdot 0,25 = 0,292;$$

$$\bar{P}_i(2) = \langle 0,5; 0,208; 0,292 \rangle.$$

Далі аналогічно:

$$P_1(3) = P_1(2)P_{11} + P_2(2)P_{21} + P_3(2)P_{31} =$$

$$= 0,5 \cdot 0 + 0,208 \cdot 0,5 + 0,292 \cdot 0,5 = 0,25;$$

$$P_2(3) = P_1(2)P_{12} + P_2(2)P_{22} + P_3(2)P_{32} =$$

$$= 0,5 \cdot 0,5 + 0,208 \cdot 1/6 + 0,292 \cdot 0,25 = 0,358;$$

$$P_3(3) = P_1(2)P_{13} + P_2(2)P_{23} + P_3(2)P_{33} =$$

$$= 0,5 \cdot 0,5 + 0,208 \cdot 1/3 + 0,292 \cdot 0,25 = 0,392;$$

$$\bar{P}_i(3) = \langle 0,25; 0,358; 0,392 \rangle;$$

$$P_1(4) = P_1(3)P_{11} + P_2(3)P_{21} + P_3(3)P_{31} =$$

$$= 0,25 \cdot 0 + 0,358 \cdot 0,5 + 0,392 \cdot 0,5 = 0,375;$$

$$P_2(4) = P_1(3)P_{12} + P_2(3)P_{22} + P_3(3)P_{32} =$$

$$= 0,25 \cdot 0,5 + 0,358 \cdot 1/6 + 0,392 \cdot 0,25 = 0,283;$$

$$P_3(4) = P_1(3)P_{13} + P_2(3)P_{23} + P_3(3)P_{33} =$$

$$= 0,25 \cdot 0,5 + 0,358 \cdot 1/3 + 0,392 \cdot 0,25 = 0,342;$$

$$\bar{P}_i(4) = \langle 0,375; 0,283; 0,342 \rangle;$$

$$P_1(5) = P_1(4)P_{11} + P_2(4)P_{21} + P_3(4)P_{31} =$$

$$= 0,375 \cdot 0 + 0,283 \cdot 0,5 + 0,342 \cdot 0,5 = 0,313;$$

$$P_2(5) = P_1(4)P_{12} + P_2(4)P_{22} + P_3(4)P_{32} =$$

$$= 0,375 \cdot 0,5 + 0,283 \cdot 1/6 + 0,342 \cdot 0,25 = 0,320;$$

$$P_3(5) = P_1(4)P_{13} + P_2(4)P_{23} + P_3(4)P_{33} =$$

$$= 0,375 \cdot 0,5 + 0,283 \cdot 1/3 + 0,342 \cdot 0,25 = 0,367;$$

$$\bar{P}_i(5) = \langle 0,313; 0,320; 0,367 \rangle;$$

$$P_1(6) = P_1(5)P_{11} + P_2(5)P_{21} + P_3(5)P_{31} =$$

$$= 0,313 \cdot 0 + 0,320 \cdot 0,5 + 0,367 \cdot 0,5 = 0,344;$$

$$P_2(6) = P_1(5)P_{12} + P_2(5)P_{22} + P_3(5)P_{32} =$$

$$= 0,313 \cdot 0,5 + 0,320 \cdot 1/6 + 0,367 \cdot 0,25 = 0,301;$$

$$P_3(6) = P_1(5)P_{13} + P_2(5)P_{23} + P_3(5)P_{33} =$$

$$= 0,313 \cdot 0,5 + 0,320 \cdot 1/3 + 0,367 \cdot 0,25 = 0,355;$$

$$\bar{P}_i(6) = \langle 0,344; 0,301; 0,355 \rangle;$$

$$P_1(7) = P_1(6)P_{11} + P_2(6)P_{21} + P_3(6)P_{31} =$$

$$= 0,344 \cdot 0 + 0,301 \cdot 0,5 + 0,355 \cdot 0,5 = 0,328;$$

$$P_2(7) = P_1(6)P_{12} + P_2(6)P_{22} + P_3(6)P_{32} =$$

$$= 0,344 \cdot 0,5 + 0,301 \cdot 1/6 + 0,355 \cdot 0,25 = 0,311;$$

$$P_3(7) = P_1(6)P_{13} + P_2(6)P_{23} + P_3(6)P_{33} =$$

$$= 0,344 \cdot 0,5 + 0,301 \cdot 1/3 + 0,355 \cdot 0,25 = 0,361;$$

$$\bar{P}_i(7) = \langle 0,328; 0,311; 0,361 \rangle;$$

$$P_1(8) = P_1(7)P_{11} + P_2(7)P_{21} + P_3(7)P_{31} =$$

$$= 0,328 \cdot 0 + 0,311 \cdot 0,5 + 0,361 \cdot 0,5 = 0,336;$$

$$P_2(8) = P_1(7)P_{12} + P_2(7)P_{22} + P_3(7)P_{32} =$$

$$= 0,328 \cdot 0,5 + 0,311 \cdot 1/6 + 0,361 \cdot 0,25 = 0,306;$$

$$P_3(8) = P_1(7)P_{13} + P_2(7)P_{23} + P_3(7)P_{33} =$$

$$= 0,328 \cdot 0,5 + 0,311 \cdot 1/3 + 0,361 \cdot 0,25 = 0,358;$$

$$\bar{P}_i(8) = \langle 0,336; 0,306; 0,358 \rangle;$$

$$P_1(9) = P_1(8)P_{11} + P_2(8)P_{21} + P_3(8)P_{31} = \\ = 0,336 \cdot 0 + 0,306 \cdot 0,5 + 0,358 \cdot 0,5 = 0,344;$$

$$P_2(9) = P_1(8)P_{12} + P_2(8)P_{22} + P_3(8)P_{32} = \\ = 0,336 \cdot 0,5 + 0,306 \cdot 1/6 + 0,358 \cdot 0,25 = 0,309;$$

$$P_3(9) = P_1(8)P_{13} + P_2(8)P_{23} + P_3(8)P_{33} = \\ = 0,336 \cdot 0,5 + 0,306 \cdot 1/3 + 0,358 \cdot 0,25 = 0,359;$$

$$\bar{P}_i(9) = \langle 0,332; 0,309; 0,359 \rangle;$$

$$P_1(10) = P_1(9)P_{11} + P_2(9)P_{21} + P_3(9)P_{31} = \\ = 0,332 \cdot 0 + 0,309 \cdot 0,5 + 0,359 \cdot 0,5 = 0,334;$$

$$P_2(10) = P_1(9)P_{12} + P_2(9)P_{22} + P_3(9)P_{32} = \\ = 0,332 \cdot 0,5 + 0,309 \cdot 1/6 + 0,359 \cdot 0,25 = 0,307;$$

$$P_3(10) = P_1(9)P_{13} + P_2(9)P_{23} + P_3(9)P_{33} = \\ = 0,332 \cdot 0,5 + 0,309 \cdot 1/3 + 0,359 \cdot 0,25 = 0,359;$$

$$\bar{P}_i(10) = \langle 0,334; 0,307; 0,359 \rangle.$$

Залежності імовірностей станів системи від номера кроку процесу переходів $P_i(k)$ для $i = 1, 2, 3$ показано на рис. 8.4.

З рис. 8.4 видно, що імовірності кожного зі станів після 6–7-го кроку практично перестають змінюватися, набувають так званих сталих або фінальних значень, тобто настає сталий режим функціонування системи.

Усталений режим існує тільки в таких систем, у яких граф переходів є зв'язним, тобто з будь-якого стану система може перейти в будь-який інший стан за кінцеву кількість кроків.

Граф переходів розглянутої системи є зв'язним (див. рис. 8.3), оскільки всі переходи з одного стану в інший здійснюються за один крок, крім переходу з першого стану в перший.

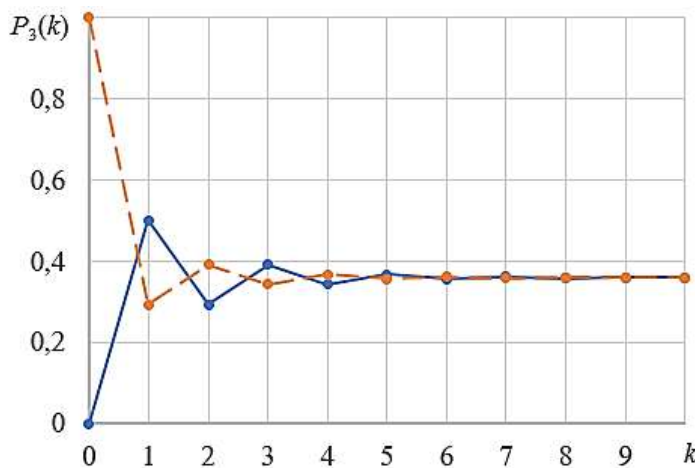
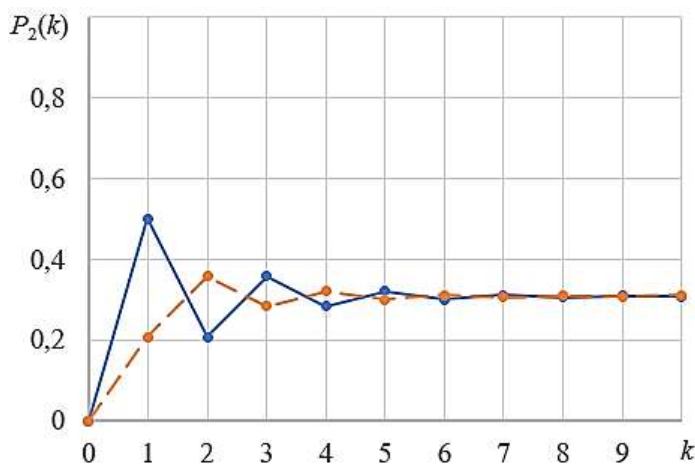
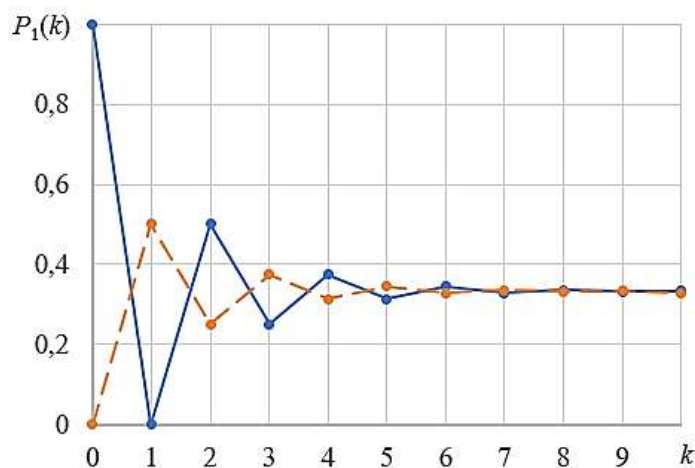


Рис 8.4. Залежності імовірностей станів системи від номера кроку процесу переходів

Цей перехід здійснюється за два кроки, наприклад система з першого стану переходить у другий, а з нього в перший.

Якщо поставити інші початкові умови, наприклад $\bar{P}_i(0) = \langle 0; 0; 1 \rangle$, то, проробивши аналогічні викладки, отримуємо залежності імовірностей станів від номера кроку процесу переходів, показані на рис. 8.4 штриховими лініями.

Із рис. 8.4 видно, що незалежно від початкових умов фінальні значення імовірностей кожного зі станів набувають однієї й тієї самої величини $P_i(k) = \text{const} = P_i$, $k \rightarrow \infty$

де P_i – фінальне значення імовірності i -го стану, що не залежить від номера переходу k .

Фінальні значення імовірностей для різних станів різні $P_1 \neq P_2 \neq P_3$, причому $P_1 + P_2 + P_3 = 1$.

У загальному вигляді для системи, що має n різних станів, сума фінальних імовірностей усіх станів дорівнює 1

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1. \quad (8.8)$$

Алгоритм розрахунку імовірностей станів системи можна подати у вигляді такої рекурентної формули:

$$P_j(k+1) = \sum_{i=1}^n P_i(k) P_{ij}, \quad (8.9)$$

де $P_j(k+1)$ – імовірність того, що система перебуватиме в j -му стані ($j = 1, 2, \dots, n$) на $(k+1)$ -му кроці процесу переходів;
 $P_i(k)$ – імовірність того, що система перебуває в i -му стані ($i = 1, 2, \dots, n$) на k -му кроці;
 P_{ij} – імовірність переходу з i -го стану в j -й;
 n – кількість різних станів системи.

Формула (8.9) має назву рівняння Маркова на честь вченого А. А. Маркова (1856–1922 р.р.), який уперше розробив математичний апарат дослідження особливого виду випадкових процесів, які згодом було названо марковськими.

У розглянутому прикладі імовірності переходів P_{ij} були постійними величинами. На практиці зазвичай ці імовірності залежать від часу τ_{ij} , протягом якого система перебувала в i -му стані до переходу в j -й стан.

Припустімо, τ_{ij} – випадкова величина, яка для будь-яких комбінацій i, j описується експоненційним законом із функцією розподілу

$$F_{ij} = 1 - e^{-\lambda_{ij}t}. \quad (8.10)$$

Тут λ_{ij} – інтенсивність переходів системи з i -го в j -й стан.

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{T_{ij}}, \quad (8.11)$$

де T_{ij} – середній час перебування системи в i -му стані до переходу в j -й стан.

За зроблених допущень процес переходів системи з одного стану в інший буде марковським, оскільки експоненційний закон має властивість відсутності післядії (відсутність «пам'яті»), що є характеристичною ознакою марковського процесу.

Розглянемо процес переходу системи з одного стану в інший за нескінченно малий проміжок часу Δt .

За визначенням $F_{ij}(\Delta t) = P(\tau_{ij} < \Delta t)$, тобто функція розподілу дорівнює імовірності того, що за час Δt буде здійснено перехід з i -го в j -й стан

$$F_{ij}(\Delta t) = P_{ij}(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda_{ij}\Delta t}. \quad (8.12)$$

З огляду на ординарність експоненційного закону розподілу система, перейшовши з i -го стану в j -й, не встигне перейти в будь-який інший стан за час Δt . Розкладемо у виразі (8.12) функцію $\psi(\Delta t) = e^{-\lambda_{ij}\Delta t}$ у ряд Тейлора

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots \quad (8.13)$$

У нашому випадку

$$x = \Delta t, \quad f(x) = \psi(\Delta t) = e^{-\lambda_{ij}\Delta t}.$$

Отже

$$\psi(0) = 1,$$

$$\psi'(\Delta t) = -\lambda_{ij}e^{-\lambda_{ij}\Delta t}, \quad \psi'(0) = -\lambda_{ij},$$

$$\psi''(\Delta t) = -\lambda_{ij}^2 e^{-\lambda_{ij}\Delta t}, \quad \psi''(0) = \lambda_{ij}^2.$$

Підставляючи отримані значення в (8.13), отримуємо:

$$\psi(\Delta t) = e^{-\lambda_{ij}\Delta t} = 1 - \lambda_{ij}\Delta t + \frac{\lambda_{ij}^2}{2}\Delta t^2 + \dots$$

У цьому виразі всі члени, починаючи з $\frac{\lambda_{ij}^2}{2} \Delta t^2$, є величинами вищого порядку малості порівняно з Δt , тому ними можна нехтувати, звідси

$$e^{-\lambda_{ij}\Delta t} \cong 1 - \lambda_{ij}\Delta t.$$

Підставляючи цей вираз у (8.12), одержуємо, що імовірність переходу системи зі стану i у стан j за нескінченно малий проміжок часу Δt дорівнює

$$P_{ij}(\Delta t) \cong \lambda_{ij}\Delta t. \quad (8.14)$$

Матриця імовірностей переходів у цьому випадку має вигляд:

$$\bar{P}_{ij}(\Delta t) = \begin{vmatrix} 1 - \sum_{j=2}^n \lambda_{ij}\Delta t & \lambda_{12}\Delta t & \dots \lambda_{1j}\Delta t & \lambda_{1n}\Delta t \\ \lambda_{21}\Delta t & 1 - \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq 2}}^n \lambda_{ij}\Delta t & \lambda_{2j}\Delta t & \lambda_{2n}\Delta t \\ \vdots & & & \\ \lambda_{i1}\Delta t & \lambda_{i2}\Delta t & \lambda_{ij}\Delta t & \lambda_{in}\Delta t \\ \lambda_{n1}\Delta t & \lambda_{n2}\Delta t & \lambda_{nj}\Delta t & 1 - \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{nj}\Delta t \end{vmatrix}. \quad (8.15)$$

У разі, коли імовірності переходів є функціями часу, імовірності станів теж є функціями часу, і рівняння (7.9) набуває такого вигляду:

$$P_j(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) P_{ij}(\Delta t), \quad (8.16)$$

де $P_i(t)$ – імовірність того, що система, яку розглядають, перебуває в i -му стані в момент часу t ;

$P_j(t + \Delta t)$ – імовірність перебування системи в j -му стані в момент часу $t + \Delta t$;

$P_{ij}(\Delta t)$ – імовірність переходу системи з i -го в j -й стан за час Δt ;

n — кількість станів системи.

Вираз (8.16) називають рівнянням Колмогорова на честь математика Андрія Миколайовича Колмогорова (1903–1987), який заклав математичні основи дослідження марковських процесів, у яких імовірності перебування в станах і переходів між ними є функціями часу.

Для того щоб марковський процес, залежний від часу, був повністю визначений, необхідно, крім матриці імовірностей переходів, задати $\bar{P}_i(0)$ — початковий розподіл імовірностей станів у момент часу $t = 0$

$$\bar{P}_i(0) = \langle \bar{P}_1(0); \bar{P}_2(0); \dots; \bar{P}_i(0); \dots; \bar{P}_n(0) \rangle. \quad (8.17)$$

Маючи розподіл (8.17) і матрицю (8.15), за допомогою рівняння Колмогорова (8.16) можна розрахувати імовірності $P_i(t)$, з якими система, яку ми розглядаємо, буде перебувати в i -му стані $i = 1, 2, \dots, n$ і в довільний момент часу t .

8.3. Перетворення Лапласа

Багато числових показників надійності елементів і систем виражаються через функції типу згортки або нескінченними рядами, члени яких є згортками функцій. Для дослідження таких показників велику допомогу може надати перетворення Лапласа. Воно зручне також під час розрахунків граничних значень функцій, лежить в основі операційного методу розв'язання диференціальних рівнянь і систем. Перетворення Лапласа дозволяє перетворити будь-яку систему звичайних диференціальних рівнянь у систему лінійних алгебраїчних рівнянь.

Нехай функція $f(t)$ кусочно-неперервна при $t \geq 0$ і має обмежене зростання, тобто

$$|f(t)| \leq Ce^{\alpha t},$$

де C і α — деякі сталі. Тоді вона називається оригіналом, а функція

$$\hat{f}(z) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-zt} dt$$

– її зображенням. Перехід від оригіналу до зображення називається перетворенням Лапласа, а перехід від зображення до відповідного оригіналу – оберненим перетворенням Лапласа. Надалі замість $\hat{f}(z)$ будемо іноді писати $f(s)$.

Перерахуємо деякі корисні властивості перетворення Лапласа.

1. Зображення лінійної комбінації функцій дорівнює лінійній комбінації зображень: якщо $f(t) = \sum_{i=1}^n c_i f_i(t)$, то $\hat{f}(z) = \sum_{i=1}^n c_i \hat{f}_i(z)$.

2. Зображенням похідної $f'(t)$ є функція $z\hat{f}(z) - f(0)$.

3. Зображення згортки функцій дорівнює добутку зображень співмножників: якщо $h(t) = f \cdot g(t)$, то $\hat{h}(z) = \hat{f}(z)\hat{g}(z)$.

4. При обчисленні граничних значень функції можна використовувати рівність $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{z \rightarrow 0} z\hat{f}(z)$. Зауважимо, що ця властивість не завжди виконується. Так, наприклад, якщо $f(t)$ являє собою суму δ -функцій, тобто $f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta_{kT}(t)$, то межа взагалі не існує. Однак:

$$\lim_{z \rightarrow 0} z\hat{f}(z) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{z}{1 - e^{-Tz}} = \frac{1}{T}.$$

5. Якщо $f(t)$ – густина розподілу імовірностей невід’ємної випадкової величини X , то її зображення $\hat{f}(z)$ задовольняє співвідношенням:

$$\hat{f}^{(k)}(0) = \int_0^{\infty} (-t)^k f(t) dt.$$

Зокрема, $\hat{f}(0) = 1$, $\hat{f}'(0) = -T$, $\hat{f}''(0) = \alpha_2$, де T – математичне сподівання, а α_2 – другий початковий момент випадкової величини X .

Розв'язання систем алгебраїчних рівнянь, отриманих із систем лінійних диференціальних рівнянь, утворюють дробово-раціональні функції вигляду:

$$\hat{f}(z) = \frac{M(z)}{N(z)} = \frac{z^m + a_1 z^{m-1} + \dots + a_m}{z^n + b_1 z^{n-1} + \dots + b_n},$$

де $m < n$. Якщо знаменник дробу $N(z)$ має лише прості корені $z_1, z_2, \dots, z_n$, то оригінал визначається рівністю:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n \frac{M(z_i)}{N'(z_i)} e^{z_i t}.$$

Якщо ж знаменник має кратні корені: z_1 кратності $r_1, z_2 - r_2, \dots, z_k - r_k$ ($r_1 + r_2 + \dots + r_k = n$), то оригінал визначається за формулою:

$$f(t) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} A_{ij} \frac{t^{r_i-j}}{(r_i-j)!} e^{z_i t}.$$

де коефіцієнти A_{ij} визначаються за формулою:

$$A_{ij} = \frac{1}{(j-1)!} \lim_{z \rightarrow z_i} \frac{d^{j-1}}{dz^{j-1}} \left[(z - z_i)^{r_i} f(z) \right], \quad i=1, 2, \dots, k, \quad j=1, 2, \dots, r_i.$$

8.4. Надійність об'єктів із двома можливими станами – схема «відмова-відновлення»

Розгляньмо технічний об'єкт, що функціонує так: об'єкт працює безперервно до відмови, після якої негайно розпочинається відновлення його працездатного стану, після відновлення об'єкт одразу починає працювати й працює безперервно до наступної відмови тощо. Часова діаграма функціонування об'єкта представлена на рис. 8.5.

У процесі функціонування об'єкт може перебувати в довільно взятий момент часу в одному з двох станів:

- 1-й стан – об'єкт працездатний, виконує свої функції;
- 2-й стан – об'єкт непрацездатний, відновлюється після відмови.

Припустимо, що час безвідмовної роботи і час відновлення працездатності є експоненційно розподіленими випадковими величинами. За цього допущення процес функціонування розглянутого об'єкта є марківським.

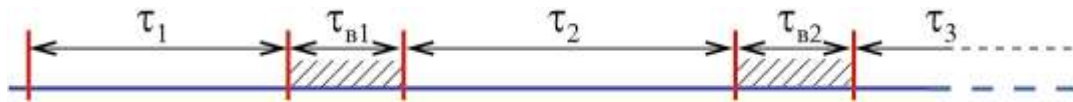


Рис. 8.5. Часова діаграма функціонування об'єкта:

τ_i – час безвідмовної роботи до i -ї відмови;

$\tau_{вi}$ – час відновлення працездатності після i -ї відмови

Позначимо:

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

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

де λ – інтенсивність відмов (або параметр потоку відмов ω , оскільки для найпростішого потоку відмов $\lambda = \omega$),

$$\lambda = 1/T_0,$$

де T_0 – середній час безвідмовної роботи.

- $F_b(t)$ – функція розподілу часу відновлення працездатності

$$F_b(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

де μ – інтенсивність відновлення;

$$\mu = 1/T_b,$$

T_b – середній час відновлення.

У разі відмови об'єкта він переходить із 1-го стану в 2-й, а в разі відновлення працездатності – із 2-го в 1-й.

Імовірності переходів за нескінченно малий проміжок часу Δt відповідно до (8.14) визначаються у вигляді:

$$P_{12}(\Delta t) = \lambda \Delta t, \quad P_{21}(\Delta t) = \mu \Delta t.$$

Якщо за час Δt не відбувається відмова об'єкта, то він залишається в 1-му стані з імовірністю $P_{11} = (1 - \lambda \Delta t)$; якщо за час Δt працездатність об'єкта, що відмовив, не буде відновлено, то він залишається у 2-му стані з імовірністю $P_{22} = (1 - \mu \Delta t)$.

Граф переходів розглянутого об'єкта показано на рис. 8.6.

Відповідно до рекурентної формули (8.16) запишемо рівняння Колмогорова, що зв'язують між собою імовірності станів об'єкта в моменті часу t і $t + \Delta t$

$$\begin{cases} P_1(t + \Delta t) = P_1(t)(1 - \lambda \Delta t) + P_2(t)\mu \Delta t, \\ P_2(t + \Delta t) = P_1(t)\lambda \Delta t + P_2(t)(1 - \mu \Delta t). \end{cases}$$

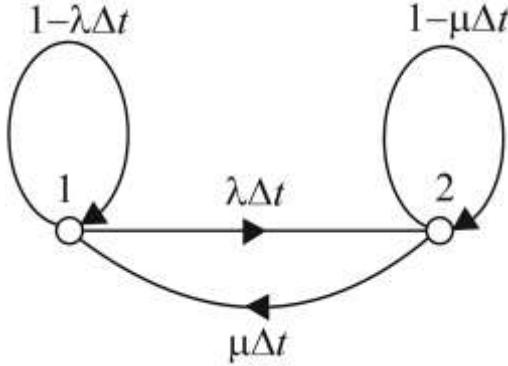


Рис. 8.6. Граф переходів системи з двома станами

Розкривши дужки, перенісши $P_i(t)$ у i -му рівнянні ($i = 1, 2$) з правої частини в ліву і розділивши обидві частини рівностей на Δt , отримаємо

$$\begin{cases} \frac{P_1(t + \Delta t) - P_1(t)}{\Delta t} = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t), \\ \frac{P_2(t + \Delta t) - P_2(t)}{\Delta t} = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t). \end{cases}$$

Перейдемо до межі при $\Delta t \rightarrow 0$ і, враховуючи, що

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = P'_i(t) \quad (i = 1, 2),$$

отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} P_1'(t) = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t), \\ P_2'(t) = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t). \end{cases} \quad (8.18)$$

Для розв'язання цієї системи необхідно задати початкові умови. Тут їх може бути дві:

а) $P_1(0) = 1, P_2(0) = 0$, якщо в початковий момент часу об'єкт перебуває в працездатному стані;

б) $P_1(0) = 0, P_2(0) = 1$, якщо в початковий момент часу об'єкт відновлюється.

Систему диференціальних рівнянь найпростіше розв'язати операторним методом. Позначимо перетворення Лапласа символом L

$$\begin{aligned} L\{P(t)\} &\rightarrow P(s), \\ L\{P'(t)\} &\rightarrow sP(s) - P(0). \end{aligned} \quad (8.19)$$

тобто перетворення Лапласа L переводить функцію $P(t)$ в зображення $P(s)$, а похідну $P'(t)$ в її зображення $sP(s) - P(0)$. Тут s – оператор Лапласа; $P(0)$ – початкова умова.

Застосувавши перетворення Лапласа (8.19) до системи диференціальних рівнянь (8.18) за початкових умов а), отримаємо таку систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} sP_1(s) - 1 = -\lambda P_1(s) + \mu P_2(s), \\ sP_2(s) = \lambda P_1(s) - \mu P_2(s). \end{cases} \quad (8.20)$$

Розв'язавши систему рівнянь (8.20), отримаємо зображення $P_1(s)$, воно дорівнює:

$$P_1(s) = \frac{s + \mu}{s(s + \lambda + \mu)}.$$

Для того щоб привести вираз $P_1(s)$ до табличного, помножимо і розділимо праву частину на величину, що дорівнює $(\lambda + \mu)$. У результаті отримаємо

$$P_1(s) = \frac{s + \mu}{s(s + \lambda + \mu)} \cdot \frac{(\lambda + \mu)}{(\lambda + \mu)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{s + \lambda + \mu}.$$

За таблицею зворотного перетворення Лапласа знаходимо

$$P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (8.21)$$

Оскільки в будь-який момент часу система перебуває або в 1-му, або в 2-му стані, то

$$P_1(t) + P_2(t) = 1. \quad (8.22)$$

Підставивши в (8.22) вираз (8.21), отримаємо

$$P_2(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (8.23)$$

Графіки функцій $P_1(t)$ і $P_2(t)$ показано на рис. 8.7 суцільними лініями.

Розв'язавши систему диференціальних рівнянь (8.18) за початкових умов б), отримаємо такі вирази імовірностей станів об'єкта, що розглядається

$$\begin{aligned} P_1(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}, \\ P_2(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}. \end{aligned} \quad (8.24)$$

На рис. 8.7 залежності $P_1(t)$ і $P_2(t)$, що визначаються виразами (8.24), показано штриховими лініями.

Із виразів (8.21), (8.23) і (8.24), а також із графіків (див. рис. 8.7) видно, що у процесі функціонування об'єкта, який розглядається, є

усталений режим, у якому імовірності станів перестають залежати від часу та незалежно від початкових умов набувають усталених (фінальних) значень $P_1(t)$ і $P_2(t)$

$$P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad P_2(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (8.25)$$

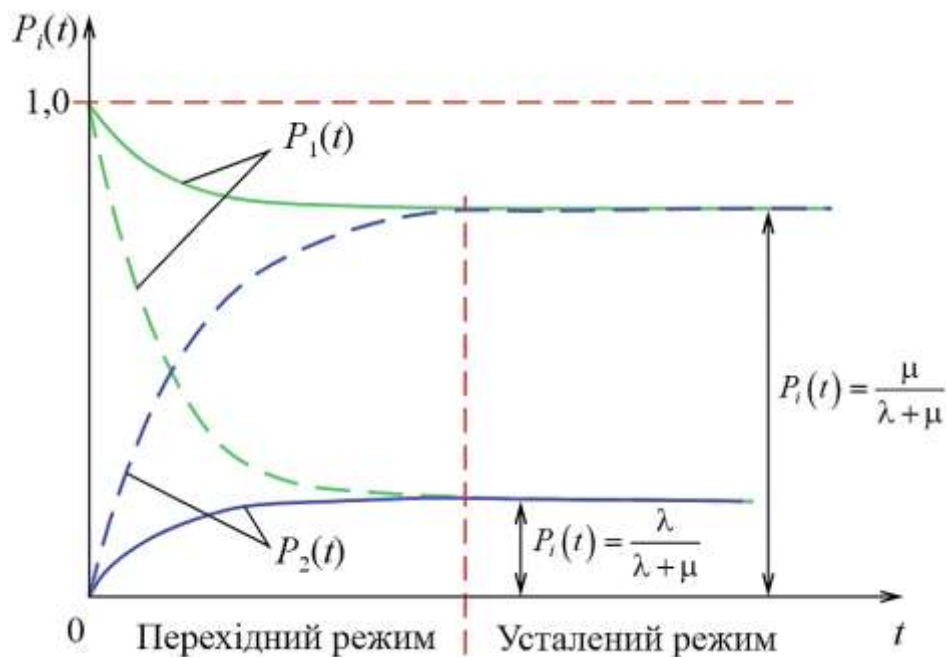


Рис. 8.7. Залежності імовірностей станів від часу

Імовірності $P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t)$, а $P_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_2(t)$, тобто вони характеризують надійність об'єкта під час його тривалої експлуатації, де P_1 – імовірність того, що об'єкт опиниться в працездатному стані в довільно взятий момент часу, достатньо віддалений від початку експлуатації, P_2 – імовірність того, що в довільний достатньо віддалений від початку експлуатації момент часу об'єкт виявиться непрацездатним.

Не можна плутати імовірності P_1 і P_2 з імовірністю безвідмовної роботи і імовірністю відмови, оскільки останні характеризують безперервний режим експлуатації об'єкта. Імовірності P_1 і P_2 формуються в результаті неодноразового переривання процесу експлуатації, зміни працездатного і непрацездатного станів.

Усталені значення імовірностей P_1 і P_2 можна визначити, не вирішуючи систему диференціальних рівнянь (8.18).

Оскільки в сталому режимі $P_1 = \text{const}$ і $P_2 = \text{const}$, то $P_1'(t) = 0$ і $P_2'(t) = 0$, а система (8.18) перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} -\lambda P_1 + \mu P_2 = 0, \\ \lambda P_1 - \mu P_2 = 0. \end{cases} \quad (8.26)$$

Розв'язавши систему рівнянь (8.26) за умови $P_1 + P_2 = 1$, отримаємо вирази фінальних імовірностей P_1 і P_2

$$P_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad P_2 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (8.27)$$

Виразивши в (8.27) інтенсивності λ і μ через середній час T_0 і T_b , отримаємо

$$P_1 = \frac{\frac{1}{T_b}}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_b}} = \frac{T_0}{T_0 + T_b}, \quad P_2 = \frac{\frac{1}{T_0}}{\frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_0}} = \frac{T_b}{T_0 + T_b}.$$

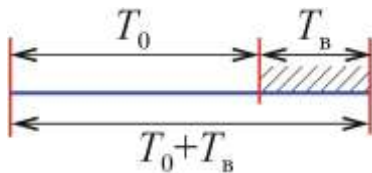


Рис. 8.8. Середні показники тривалості одного циклу

Сума $T_0 + T_b$ визначає середню тривалість одного циклу «безвідмовна робота – відновлення» процесу функціонування, який у об'єкта, що розглядається, полягає в постійному повторенні цього циклу (рис. 8.8).

Відношення $\frac{T_0}{T_0 + T_b}$ показує, яку частку в середній тривалості одного циклу займає середній час, протягом якого об'єкт перебуває в працездатному стані, тобто готовий виконувати свої функції. Тому імовірність P_1 , називається коефіцієнтом готовності K_r

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_b}. \quad (8.28)$$

Якщо, наприклад, $K_r = 0,8$, то це означає, що в середньому 80 % часу об'єкт, який розглядають, перебуває в працездатному стані і готовий виконувати свої функції.

Оскільки марковські процеси мають ергодичність, відповідно до якої середнє за часом дорівнює середньому за ансамблем, при $K_r = 0,8$ із кожних 10 об'єктів у будь-який довільно взятий момент часу, досить віддалений від початку експлуатації, в середньому вісім об'єктів перебувають у працездатному стані, а два об'єкти відновлюються після відмови.

Із розглянутого прикладу аналізу надійності об'єктів із двома можливими станами можна сформулювати такий алгоритм розв'язання задач на основі теорії марковських процесів.

1. На основі аналізу процесу функціонування відокремлюють характерні стани, у яких може перебувати об'єкт, що розглядається.

2. Розробляється математична модель функціонування об'єкта, що розглядається, у вигляді графа переходів або матриці імовірностей переходів.

3. Записується система рівнянь Колмогорова, що зв'язує між собою імовірності знаходження об'єкта в кожному зі станів у сусідні моменти часу t і $t + \Delta t$.

4. Отримана система скінченно-різницевої рівнянь перетворюється на систему диференціальних рівнянь, розв'язання якої за заданих початкових умов дає залежності $P_i(t)$ для всіх n розглянутих станів об'єкта.

5. Якщо граф переходів розглянутого об'єкта є зв'язним, тобто об'єкт із будь-якого стану може перейти в будь-який інший стан за скінченна кількість кроків, то процес його функціонування має сталий режим, у якому імовірності всіх станів перестають залежати від часу, набуваючи фінальних значень $P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$.

6. У сталому режимі система диференціальних рівнянь перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь, тому що $\lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) = P_i = \text{const}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} P_i'(t) = 0$. Розв'язання отриманої системи алгебраїчних рівнянь за

умови $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ дає значення фінальних імовірностей P_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

8.5. Математична модель процесу функціонування локомотива

У будь-якої одиниці тягового рухомого складу (для стислості вживатимемо термін локомотив, маючи на увазі під цим не тільки електровози та тепловози, а й електро- та дизель-поїзди) у процесі експлуатації можуть виникати відмови двох типів.

1. *Відмова першого типу*, у разі виникнення якої працездатний стан локомотива відновлюється локомотивною бригадою на шляху прямування.

2. *Відмова другого типу*, яка потребує для відновлення працездатного стану локомотива постановки його в депо (ПТОЛ) на плановий ремонт.

У процесі функціонування локомотив може перебувати в таких станах.

1. Локомотив перебуває в працездатному стані та виконує свої функції – працює.

2. Локомотив відновлюється на шляху прямування після відмови першого типу.

3. Локомотив перебуває в очікуванні непланового ремонту після відмови другого типу.

4. Проводиться відновлення працездатного стану локомотива на неплановому ремонті.

5. Очікування початку експлуатації після закінчення непланового ремонту.

6. Відстій через нерівномірність руху.

7. Очікування початку планового ремонту.

8. Плановий ремонт.

9. Очікування початку експлуатації після закінчення планового ремонту.

Граф переходів локомотива з одного стану в інший за нескінченно малий проміжок часу Δt за умови, що всі тимчасові параметри процесу функціонування локомотива є випадковими величинами, розподіленими за експоненціальним законом, кожний зі своєю інтенсивністю, показано на рис. 8.9.

Імовірності переходів локомотива з одного стану в інший за нескінченно малий проміжок часу Δt записуються таким чином:

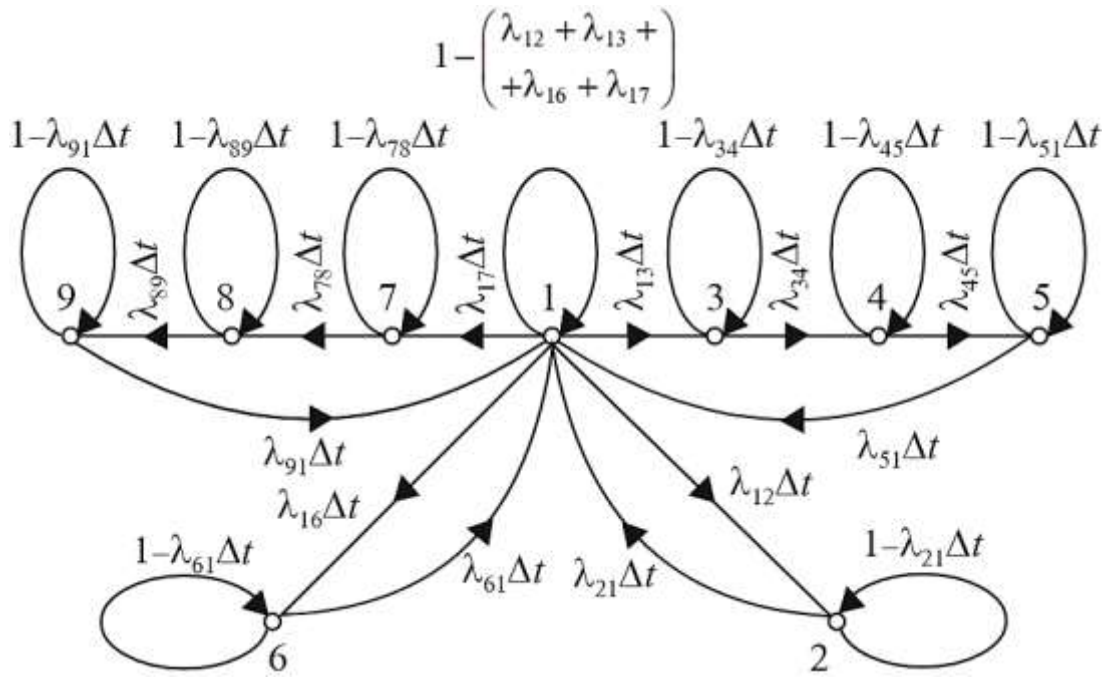


Рис. 8.9. Граф переходів локомотива

$\lambda_{12}\Delta t$ – імовірність виникнення відмови першого типу; $\lambda_{12} = \frac{1}{T_0}$;

T_0 – середнє значення напрацювання на відмову першого типу;

$\lambda_{13}\Delta t$ – імовірність виникнення відмови другого типу; $\lambda_{13} = \frac{1}{T_1}$;

T_1 – середнє значення напрацювання на відмову другого типу;

$\lambda_{21}\Delta t$ – імовірність відновлення працездатності після відмови першого типу; $\lambda_{21} = \frac{1}{T_2}$; T_2 – середній час відновлення працездатності після відмови першого типу;

$\lambda_{34}\Delta t$ – імовірність постановки локомотива в депо для проведення непланового ремонту; $\lambda_{34} = \frac{1}{T_3}$; T_3 – середній час очікування початку непланового ремонту;

$\lambda_{45}\Delta t$ – імовірність закінчення непланового ремонту; $\lambda_{45} = \frac{1}{T_4}$; T_4 – середній час виконання непланового ремонту;

$\lambda_{51}\Delta t$ – імовірність видачі локомотива в

експлуатацію після непланового ремонту; $\lambda_{51} = \frac{1}{T_5}$; T_5 – середній час очікування початку експлуатації після непланового ремонту; $\lambda_{16}\Delta t$ – імовірність постановки локомотива у відстій через нерівномірність руху; $\lambda_{16} = \frac{1}{T_{10}}$, T_{10} – середня тривалість роботи локомотива до постановки у відстій; $\lambda_{61}\Delta t$ – імовірність закінчення відстою (видачі локомотива в експлуатацію); $\lambda_{61} = \frac{1}{T_6}$, T_6 – середнє значення часу відстою; $\lambda_{17}\Delta t$ – імовірність вилучення локомотива з експлуатації для проведення планового ремонту; $\lambda_{17} = \frac{1}{T_{11}}$, T_{11} – середня тривалість роботи локомотива до постановки на плановий ремонт; $\lambda_{78}\Delta t$ – імовірність постановки локомотива в депо для проведення планового ремонту; $\lambda_{78} = \frac{1}{T_7}$, T_7 – середній час очікування початку планового ремонту; $\lambda_{89}\Delta t$ – імовірність закінчення планового ремонту; $\lambda_{89} = \frac{1}{T_8}$, T_8 – середня тривалість планового ремонту; $\lambda_{91}\Delta t$ – імовірність видачі локомотива в експлуатацію після планового ремонту; $\lambda_{91} = \frac{1}{T_9}$, T_9 – середній час очікування початку експлуатації після планового ремонту.

Рівняння Колмогорова (8.16), що зв'язують між собою імовірності станів локомотива в моменти часу t і $t + \Delta t$, записуються в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 P_1(t + \Delta t) &= P_1(t)(1 - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{16} + \lambda_{17})\Delta t) + \\
 &\quad + P_2(t)\lambda_{21}\Delta t + P_5(t)\lambda_{51}\Delta t + P_6(t)\lambda_{61}\Delta t + P_9(t)\lambda_{91}\Delta t, \\
 P_2(t + \Delta t) &= P_1(t)\lambda_{12}\Delta t + P_2(t)(1 - \lambda_{21}\Delta t), \\
 P_3(t + \Delta t) &= P_1(t)\lambda_{13}\Delta t + P_3(t)(1 - \lambda_{34}\Delta t), \\
 P_4(t + \Delta t) &= P_3(t)\lambda_{34}\Delta t + P_4(t)(1 - \lambda_{45}\Delta t),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_5(t + \Delta t) &= P_4(t)\lambda_{45}\Delta t + P_5(t)(1 - \lambda_{51}\Delta t), \\
P_6(t + \Delta t) &= P_1(t)\lambda_{16}\Delta t + P_6(t)(1 - \lambda_{61}\Delta t), \\
P_7(t + \Delta t) &= P_1(t)\lambda_{17}\Delta t + P_7(t)(1 - \lambda_{78}\Delta t), \\
P_8(t + \Delta t) &= P_7(t)\lambda_{78}\Delta t + P_8(t)(1 - \lambda_{89}\Delta t), \\
P_9(t + \Delta t) &= P_8(t)\lambda_{89}\Delta t + P_9(t)(1 - \lambda_{91}\Delta t).
\end{aligned}$$

Розкривши дужки, перенісши $P_i(t)$ в i -му рівнянні ($i = 1, 2, \dots, 9$) з правої частини в ліву, розділивши обидві частини рівностей на Δt і перейшовши до межі за умови $\Delta t \rightarrow 0$, отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned}
P_1'(t) &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{16} + \lambda_{17})P_1(t) + \\
&+ \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{51}P_5(t) + \lambda_{61}P_6(t) + \lambda_{91}P_9(t), \\
P_2'(t) &= \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{21}P_2(t), \\
P_3'(t) &= \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{34}P_3(t), \\
P_4'(t) &= \lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{45}P_4(t), \\
P_5'(t) &= \lambda_{45}P_4(t) - \lambda_{51}P_5(t), \\
P_6'(t) &= \lambda_{16}P_1(t) - \lambda_{61}P_6(t), \\
P_7'(t) &= \lambda_{17}P_1(t) - \lambda_{78}P_7(t), \\
P_8'(t) &= \lambda_{78}P_7(t) - \lambda_{89}P_8(t), \\
P_9'(t) &= \lambda_{89}P_8(t) - \lambda_{91}P_9(t).
\end{aligned} \right. \quad (8.29)$$

Задавшись початковими умовами $P_1(0) = 1$, $P_2(0) = P_3(0) = \dots = P_9(0) = 0$ розв'яжемо отриману систему диференціальних рівнянь і знайдемо залежності $P_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, 9$.

Однак для практики найбільший інтерес представляє частка часу, протягом якого локомотив перебуває в кожному зі станів під час тривалої експлуатації, тобто за умови $t \rightarrow \infty$. Оскільки граф переходів локомотива (див. рис. 8.9) є зв'язковим, то в процесі функціонування локомотива існує усталений режим, у якому імовірності всіх станів

перестають залежати від часу і набувають фінальних значень $P_i(t) = \text{const}, i = 1, 2, \dots, 9$.

У сталому режимі система диференціальних рівнянь (8.29) перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{16} + \lambda_{17}) P_1 + \lambda_{21} P_2(t) + \lambda_{51} P_5 + \lambda_{61} P_6 + \lambda_{91} P_9 = 0, \\ \lambda_{12} P_1 - \lambda_{21} P_2 = 0, \\ \lambda_{13} P_1 - \lambda_{34} P_3 = 0, \\ \lambda_{34} P_3 - \lambda_{45} P_4 = 0, \\ \lambda_{45} P_4 - \lambda_{51} P_5 = 0, \\ \lambda_{16} P_1 - \lambda_{61} P_6 = 0, \\ \lambda_{17} P_1 - \lambda_{78} P_7 = 0, \\ \lambda_{78} P_7 - \lambda_{89} P_8 = 0, \\ \lambda_{89} P_8 - \lambda_{91} P_9 = 0. \end{array} \right.$$

Розв'язок цієї системи виходить за умови

$$\sum_{i=1}^9 P_i = 1. \quad (8.30)$$

Для розв'язання виразимо імовірності всіх станів $P_2 - P_9$ через імовірність першого стану P_1 .

Із другого рівняння знаходимо $P_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}} P_1$.

З третього рівняння знаходимо $P_3 = \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34}} P_1$.

З четвертого рівняння знаходимо $P_4 = \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{45}} P_3 = \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{45}} \cdot \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34}} P_1 = \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{45}} P_1$.

З п'ятого рівняння знаходимо $P_5 = \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{51}} P_4 = \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{51}} \cdot \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{45}} P_1 = \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{51}} P_1$.

Із шостого рівняння знаходимо $P_6 = \frac{\lambda_{16}}{\lambda_{61}} P_1$.

Із сьомого рівняння знаходимо $P_7 = \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{78}} P_1$.

З восьмого рівняння знаходимо $P_8 = \frac{\lambda_{78}}{\lambda_{89}} P_7 = \frac{\lambda_{78}}{\lambda_{89}} \cdot \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{78}} P_1 = \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{89}} P_1$.

З дев'ятого рівняння знаходимо $P_9 = \frac{\lambda_{89}}{\lambda_{91}} P_8 = \frac{\lambda_{89}}{\lambda_{91}} \cdot \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{89}} P_1 = \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{91}} P_1$.

Підставивши вирази всіх імовірностей $P_2 - P_9$ у рівняння (8.30), отримаємо

$$P_1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}} P_1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{34}} P_1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{45}} P_1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{51}} P_1 + \frac{\lambda_{16}}{\lambda_{61}} P_1 + \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{78}} P_1 + \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{89}} P_1 + \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{91}} P_1 = 1.$$

Розв'язавши це рівняння відносно P_1 отримаємо

$$P_1 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}} + \lambda_{13} \left(\frac{1}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{45}} + \frac{1}{\lambda_{51}} \right) + \frac{\lambda_{16}}{\lambda_{61}} + \lambda_{17} \left(\frac{1}{\lambda_{78}} + \frac{1}{\lambda_{89}} + \frac{1}{\lambda_{91}} \right)}. \quad (8.31)$$

Імовірність P_1 показує частку часу, протягом якого локомотив працює безплатний і використовується за призначенням, тому її називають коефіцієнтом технічного використання локомотива $K_{\text{тв}} = P_1$.

Виразивши всі інтенсивності λ_{ij} через відповідні середні значення $T_0 - T_{11}$, отримаємо

$$K_{\text{тв}} = \frac{1}{1 + \frac{T_2}{T_0} + \frac{T_3 + T_4 + T_5}{T_1} + \frac{T_6}{T_{10}} + \frac{T_7 + T_8 + T_9}{T_{11}}}. \quad (8.32)$$

Розглянута модель функціонування локомотива перетворюється на розглянуту вище модель функціонування об'єкта з двома можливими станами, якщо локомотив у процесі експлуатації матиме тільки відмови першого типу і не матиме непланових і планових ремонтів, а також відстійів за нерівномірністю руху, тобто якщо $T_1 \rightarrow \infty$, $T_{10} \rightarrow \infty$, $T_{11} \rightarrow \infty$.

Тоді

$$K_{\text{тв}} = \frac{1}{1 + \frac{T_2}{T_0}} = \frac{T_0}{T_0 + T_2}. \quad (8.33)$$

У цьому разі формула (8.33) збігається з формулою (8.28), виведеною для об'єктів із двома станами, тобто модель функціонування локомотива, яку розглядають, є загальнішим випадком, з якого модель функціонування об'єктів із двома станами виводиться як окремий випадок.

Коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}$ являє собою імовірність того, що локомотив опиниться в працездатному стані в довільний, досить віддалений від початку експлуатації момент часу. Локомотив працездатний, якщо він перебуває в 1-му, 5, 6 або 9-му стані, тобто

$$K_{\text{г}} = P_1 + P_5 + P_6 + P_9. \quad (8.34)$$

Підставивши в (8.34) значення імовірностей P_5 , P_6 і P_9 , виражені через P_1 , отримаємо

$$K_{\text{г}} = P_1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{51}} P_1 + \frac{\lambda_{16}}{\lambda_{61}} P_1 + \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{91}} P_1 = P_1 \left[1 + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{51}} + \frac{\lambda_{16}}{\lambda_{61}} + \frac{\lambda_{17}}{\lambda_{91}} \right].$$

Виразивши інтенсивності λ_{ij} через середні значення відповідних часів, а імовірність P_1 – за формулою (8.31), отримаємо

$$K_{\text{г}} = \frac{1 + \frac{T_5}{T_1} + \frac{T_6}{T_{10}} + \frac{T_9}{T_{11}}}{1 + \frac{T_2}{T_0} + \frac{T_3 + T_4 + T_5}{T_1} + \frac{T_6}{T_{10}} + \frac{T_7 + T_8 + T_9}{T_{11}}}. \quad (8.35)$$

Величина

$$K_{\text{н}} = 1 - K_{\text{г}}, \quad (8.36)$$

виражена у відсотках, показує, яка частина локомотивів перебуває в непрацездатному стані, і є аналогом використовуваного в локомотивному господарстві показника – загальний відсоток несправних локомотивів. Розрахунки за формулою (8.35) для різних локомотивних депо показують, що коефіцієнт готовності перебуває в межах 0,87–0,92, або в середньому становить близько 0,9.

Однак показник – відсоток несправних локомотивів дає тільки загальне уявлення про те, яка частина локомотивів перебуває в непрацездатному стані, а K_n , розрахований за формулами (8.36) та (8.35), розкриває зв'язок цього показника з параметрами процесу функціонування локомотивів $T_0 - T_{11}$ і дає змогу найефективніше управляти їхніми станами, впливаючи на ті параметри $T_0 - T_{11}$, до яких найчутливіші експлуатаційні коефіцієнти – коефіцієнт технічного використання (8.32), коефіцієнт готовності (8.35), коефіцієнт непрацездатності (8.36). Показниками чутливості є значення часткових похідних від експлуатаційних коефіцієнтів за кожним із параметрів $T_0 - T_{11}$ процесу функціонування локомотива.

За допомогою експлуатаційних коефіцієнтів можна оцінити ефективність різних організаційно-технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності локомотивів. Якщо в результаті проведення будь-якого заходу збільшуються середні значення напрацювання T_0 і T_{11} до відмови першого і другого типу, збільшується напрацювання до планового ремонту T_{11} або скорочується час простою локомотива на неплановому ремонті T_4 чи на плановому ремонті T_8 тощо, то в результаті коефіцієнти технічного використання $K_{тв}$ і готовності K_r збільшуються, а коефіцієнт непрацездатності K_n – зменшується, що призводить до загального поліпшення всіх техніко-економічних показників роботи локомотивного парку.

Запитання до самоконтролю

1. Що таке комплексні показники надійності та які властивості вони охоплюють?
2. Які часові періоди враховуються у типовому циклі роботи одиниці рухомого складу між поточними ремонтами?
3. Як на практиці змінюється структура циклу роботи через відмови об'єкта?
4. Яке визначення має коефіцієнт готовності відповідно до ДСТУ 2860-94?
5. Як обчислюється коефіцієнт готовності (наведіть формулу та поясніть її складові)?
6. Які часові інтервали не враховуються при обчисленні коефіцієнта готовності?

7. Чому коефіцієнт готовності не дозволяє оцінити тривалість безперервної роботи до відмови?
8. У яких випадках доцільно використовувати коефіцієнт оперативної готовності?
9. Яким чином обчислюється коефіцієнт оперативної готовності?
10. Що характеризує коефіцієнт технічного використання?
11. Яка відмінність між коефіцієнтом технічного використання та коефіцієнтом готовності?
12. Як обчислюється коефіцієнт технічного використання рухомого складу (поясніть формулу)?
13. Про що свідчить значення коефіцієнта технічного використання у прикладі з локомотивним парком депо?
14. Що таке коефіцієнт неготовності та як він розраховується?
15. У чому різниця між середнім і стаціонарним коефіцієнтом готовності?
16. Яке значення має коефіцієнт збереження ефективності та як він визначається?
17. Як розраховується коефіцієнт витрат на технічне обслуговування і ремонт?
18. Що таке ремонтісткість і які дані потрібні для її обчислення?
19. Які джерела інформації використовуються для визначення комплексних показників надійності?
20. Які одиниці об'єкта можуть розглядатися при обчисленні комплексних показників – загалом чи окремо?
21. Що таке марковський процес? Яку властивість він має?
22. Що означає «відсутність пам'яті» в контексті марковського процесу?
23. Які елементи необхідні для повного визначення марковського процесу?
24. Як записується й інтерпретується матриця імовірностей переходів?
25. Яка вимога накладається на суму елементів кожного рядка матриці переходів?
26. Що таке граф переходів? Як він пов'язаний із матрицею переходів?
27. Що означає початкова умова марковського процесу?
28. Як визначити імовірність перебування в певному стані на k -му кроці?
29. Коли настає сталий режим функціонування системи в марковському процесі?

30. Що означає зв'язність графа переходів і чому вона важлива?
31. Яке рівняння називається рівнянням Маркова?
32. Яке рівняння називається рівнянням Колмогорова?
33. Як виглядає функція розподілу часу перебування в стані при експоненційному законі розподілу?
34. Що таке інтенсивність переходу та як вона пов'язана із середнім часом перебування в стані?
35. Яка умова забезпечує, що імовірність переходу за малий час Δt наближено дорівнює $\lambda \Delta t$?
36. Скільки станів має система, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу?
37. Яким чином система, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу, переходить зі стану 1 в інші стани?
38. Як обчислюються імовірності переходу системи, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу, із стану 2?
39. Які імовірності переходу системи, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу, зі стану 3?
40. Якщо система, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу, починає з першого стану, як виглядає вектор початкових умов?
41. Обчисліть імовірність перебування системи, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу, у стані 2 на першому кроці.
42. Який вигляд має вектор розподілу імовірностей системи, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу, після другого кроку?
43. Як змінюються імовірності станів системи, що приведена у прикладі для моделювання марковського процесу, на кроках 3–5?
44. Які фінальні значення імовірностей станів у прикладі для моделювання марковського процесу?
45. Який вигляд має рівняння Маркова для трьох станів?
46. Як експоненційний закон розподілу забезпечує відсутність пам'яті?
47. Як виглядає рівняння Колмогорова для випадку часу-залежного процесу?
48. Що таке перетворення Лапласа? Як називається обернений процес?
49. Які умови має задовольняти функція, щоб до неї можна було застосувати перетворення Лапласа?
50. Як виглядає формула перетворення Лапласа для функції $f(t)$?

51. Які основні властивості має перетворення Лапласа? Назвіть принаймні три.
52. Яка формула використовується для зображення похідної функції?
53. Як виглядає зображення згортки двох функцій у просторі Лапласа?
54. У яких випадках перетворення Лапласа допомагає при обчисленні граничних значень функцій?
55. Яким чином можна знайти математичне сподівання і другий момент випадкової величини за її зображенням?
56. Який вигляд мають дробово-раціональні функції, що виникають при розв'язанні систем?
57. Як обчислюється оригінал, якщо знаменник має прості або кратні корені?
58. Які два основні стани може мати об'єкт у схемі «відмова—відновлення»?
59. Якими розподілами описуються часи безвідмовної роботи і відновлення?
60. Як виглядає функція розподілу часу безвідмовної роботи?
61. Які позначення використовуються для інтенсивностей відмов і відновлення?
62. Що таке коефіцієнт готовності K_r ? Який його фізичний зміст?
63. Що таке усталений режим у контексті марковських процесів?
64. Який вигляд мають рівняння Колмогорова для цієї системи?
65. Як отримати систему диференціальних рівнянь із рівнянь Колмогорова?
66. Як за допомогою перетворення Лапласа розв'язується система (8.18)?
67. Чому сума імовірностей перебування у станах дорівнює 1?
68. Яким буде граф переходів для об'єкта з двома станами?
69. Запишіть систему рівнянь Колмогорова для випадку «відмова—відновлення».
70. Знайдіть аналітичні вирази для $P_1(t)$ та $P_2(t)$, якщо $P_1(0)=1$, $P_2(0)=0$.
71. Як виглядає система алгебраїчних рівнянь у сталому режимі?
72. Обчисліть фінальні значення P_1 і P_2 , якщо $T_0=12$ год, $T_v=4$ год.
73. Поясніть фізичне значення того, що $K_r=0,8$.
74. У чому полягає ергодичність марковських процесів?
75. Які типи відмов враховуються у моделі функціонування локомотива?

76. Скільки станів передбачає модель функціонування локомотива? Опишіть кожен із них.
77. Яке припущення зроблено щодо розподілу випадкових величин часу переходів між станами?
78. Що таке інтенсивність переходу та як вона пов'язана із середнім часом перебування у стані?
79. Який вигляд має граф переходів для моделі функціонування локомотива?
80. Які рівняння використовують для опису імовірностей переходів локомотива?
81. Яка система рівнянь утворюється у сталому режимі функціонування локомотива?
82. Як визначається імовірність перебування локомотива в кожному зі станів у сталому режимі?
83. Яке значення має імовірність перебування в першому стані P_1 у моделі функціонування локомотива?
84. Що таке коефіцієнт технічного використання локомотива $K_{\text{ТВ}}$? Як він обчислюється?
85. Що таке коефіцієнт готовності $K_{\text{Г}}$ локомотива? Як він обчислюється?
86. Як визначається коефіцієнт непрацездатності $K_{\text{Н}}$? У чому його практичний зміст?
87. Яким чином модель функціонування локомотива зв'язана з моделлю об'єкта з двома станами?
88. Чим корисна оцінка чутливості експлуатаційних коефіцієнтів до параметрів процесу функціонування?
89. Які заходи можуть підвищити $K_{\text{ТВ}}$ і $K_{\text{Г}}$, та знизити $K_{\text{Н}}$?
90. Які переходи відповідають інтенсивностям $\lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{16}, \lambda_{17}$ переходів в моделі функціонування локомотива?
91. Як обчислюється P_2 через P_1 ? А P_3, P_4, P_5 в моделі функціонування локомотива?
92. Запишіть формулу для P_1 у сталому режимі в моделі функціонування локомотива.
93. Виведіть формулу для коефіцієнта готовності $K_{\text{Г}}$ через P_1 та інтенсивності для моделі функціонування локомотива.
94. Як виглядає коефіцієнт технічного використання $K_{\text{ТВ}}$, якщо враховано лише відмови першого типу?
95. Наведіть приклад, коли $K_{\text{Г}}=0,9$. Що це означає для локомотивного господарства?

96. Якщо T_4 зменшити вдвічі, як це вплине на K_Γ в моделі функціонування локомотива? Поясніть.
97. Яке значення має сума всіх імовірностей станів $P_1+P_2+\dots+P_9$ в моделі функціонування локомотива ?
98. Для яких станів локомотив вважається працездатним?
99. В чому полягає зв'язаність графу переходів?
100. Чому граф переходів повинен бути зв'язним для існування усталеного режиму?

Моделі відмов елементів конструкції рухомого складу

9.1. Характер виникнення відмов рухомого складу

В основі оцінювання та прогнозування показників надійності, по суті, в основі всієї теорії надійності, лежать відомості про відмови, коли вихід з ладу машини чи елемента конструкції відбувається, зазвичай, несподівано, без попередніх ознак несправності.

Причинами відмов є дефекти, що є у виробі з моменту його виготовлення або проявляються в процесі експлуатації. *Дефекти* – це несуттєві ушкодження (неоднорідність матеріалу, поломки, тріщини, зношування, обрив, пробій ізоляції) або розрегулювання, що виявляється у відхиленні параметрів функціонування виробу від номінальних значень. Наявність дефектів зумовлена прорахунками, допущеними під час проєктування, якістю матеріалу, похибками і рівнем технології виготовлення та відхиленнями від встановлених норм експлуатації виробу. Дефекти проявляються як несправності. Але, з погляду надійності, дефекти і несправності, як і їхні прояви, слід поділяти на *суттєві*, що впливають на працездатність виробу, і *несуттєві*, що не чинять такого впливу. Відмови – це суттєві несправності.

Наприклад, під час експлуатації тягових електричних двигунів виявляється багато несправностей. Це – низький рівень ізоляції, пробій або міжвиткове замикання якірних і полюсних обмоток, відгар і злам виводів головних і додаткових полюсів, руйнування або ослаблення склобандажа, підгар, оплавлення або деформація колекторних пластин, задири колектора, виплавка півників, обрив балансувальних тягарів, ушкодження якірних підшипників, потрапляння змащення в остов та ін. Для тягового електричного двигуна всі зазначені несправності є суттєвими і призводять до відмови. Водночас випадання шплінта, що фіксує валик рухомого контакту контактора, теж є несправністю. Але

ця несправність не є суттєвою, оскільки контактор може продовжувати деякий час виконувати свої функції.

Наявність тих чи інших дефектів у конкретному одиничному виробі неможливо передбачити через безліч різноманітних причин випадкового характеру. Тому відмова виробу – випадкова подія. Заздалегідь не відомо, чи буде вона мати місце, тим більше не можна передбачити точно момент її появи. Але, характеризуючи в середньому сукупність однорідних виробів, можна оцінити імовірність настання відмови. Таким чином, унаслідок випадковості відмов кількісні характеристики надійності виробів є імовірнісними.

Одиниця рухомого складу є дуже складним об'єктом, що складається з багатьох взаємопов'язаних елементів різної конструкції та принципів дії, наприклад для тепловоза це дизель із системами забезпечення його працездатності, тягові електричні двигуни та генератори, механічні й гідравлічні системи, апаратура управління та контролю, несучі та ходові частини тощо. Тому в них зустрічаються всі типи дефектів і пов'язані з ними види відмов, які вивчаються в теорії надійності машин. Залежно від природи виникнення і характеру протікання процесів, що передують відмовам, їх можна розділити на два види: раптові та поступові відмови. Зазначений поділ умовний і більше зручний з методичної точки зору, оскільки одні й ті самі дефекти, не суттєві в одних умовах, можуть стати суттєвими в інших.

В інженерному аналізі інформації, отриманої під час випробувань або під час роботи одиниці рухомого складу, необхідно враховувати умови, характер прояву та наслідки виявлених відмов і пошкоджень. Зокрема, слід диференційовано аналізувати відмови, виявлені у шляху прямування, під час проведення ТО або ПР. У цьому разі можна відокремити типові відмови, що часто повторюються, характерні для певної серії рухомого складу. Знання причин, частоти і характеру попереднього прояву типових відмов, узагальнення досвіду їх усунення дають змогу значно зменшити втрати від простоїв рухомого складу у ремонтах. З іншого боку, глибокий аналіз і правильна класифікація відмов за зазначеними вище ознаками мають велике практичне значення для вдосконалення нормативно-технічної документації та визначення ступеня відповідальності за відмови, які виникають, не тільки експлуатаційників, а й проєктувальників та виготовлювачів рухомого складу.

На рис. 9.1 подано узагальнену характеристику зміни інтенсивності відмов протягом усього терміну служби виробу. Виділено три ділянки, що розділяються.

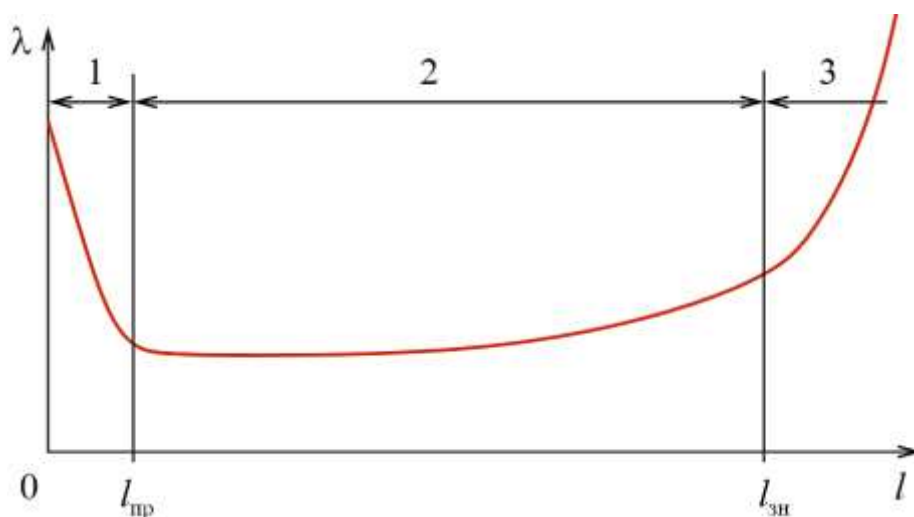


Рис. 9.1. Характер зміни інтенсивності відмов у міру збільшення наробітку

На першому, званому періодом припрацювання, інтенсивність відмов зменшується. У цей період проявляються випадкові відмови, спричинені дефектами розрахунку, конструювання та виготовлення, недостатнім контролем якості збирання та монтажу обладнання, якості комплектувальних деталей і матеріалів. Далі, у період нормальної експлуатації раптові відмови превалюють над поступовими. Елементи виробу виходять з ладу під дією навантажень, що перевищують розрахункові значення. У період нелінійно наростаючої інтенсивності зносу і старіння матеріалів проявляються поступові і залежні відмови аж до досягнення виробом граничного стану.

Зазначені особливості характеру зміни інтенсивності відмов у різні періоди експлуатації виробу використовують для побудови імовірнісно-статистичних моделей відмов, що дають змогу прогнозувати поведінку технічних систем за умов невідомих причинно-наслідкових зв'язків між вхідними факторами та вихідними параметрами процесу. Наближено вибрані апроксимувальні рівняння кривих розподілу випадкових величин дають змогу не тільки описати характер зміни працездатності об'єкта в часі, а й розрахувати кількісні характеристики його надійності залежно від призначення і конкретних умов нормальної експлуатації.

Взагалі у теорії надійності розглядають такі основні ідеалізовані схеми моделі відмов: *миттєвих ушкоджень*, *ушкоджень, що накопичуються*, і *релаксації*. Можлива й одночасна дія кількох незалежних причин відмов.

Кожній схемі (моделі) відповідає цілком певний закон розподілу напрацювання до відмови, що відповідає схемі по суті. Але є, очевидно, і деяка узагальнена форма закону.

Теорія надійності вказує, що будь-який розподіл часу безвідмовної роботи може бути формально записаний у такому вигляді:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \varphi(t) dt \right]. \quad (9.1)$$

Вираз (9.1) є інтегральною формою закону розподілу в загальному випадку. Маючи на увазі, що густина розподілу $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$, отримаємо вираз закону розподілу в диференціальній формі:

$$f(t) = \varphi(t) e^{-\int_0^t \varphi(t) dt}. \quad (9.2)$$

Тут функція $\varphi(t)$ має сенс інтенсивності відмов. Залежно від виду функції $\varphi(t)$, що визначається властивостями елементів і умовами експлуатації, за виразами (9.1) і (9.2) можна отримати той чи інший закон розподілу тривалості роботи до відмови.

Узагальнена форма закону розподілу слугує основою для математичного опису імовірнісних характеристик ідеалізованих схем розвитку фізичних процесів виникнення відмов, тобто моделей відмов. У всіх цих схемах не враховуються розкиди початкових робочих властивостей і рівнів навантаження, що призводять до виробничих та експлуатаційних відмов, що й визначає ідеальність моделей. Незважаючи на це, слід розглянути такі моделі, оскільки за вказаних припущень вони досить добре застосовні для характеристики процесів розвитку пошкоджень багатьох об'єктів.

9.2. Види моделей відмов та вимоги до них

Вичерпною характеристикою будь-якої випадкової величини, у тому числі і наробітку до відмови, наробітку між відмовами, наробітку

до критичної відмови, ресурсу, терміну служби, терміну збережуваності, часу відновлення, є імовірнісний розподіл цієї величини чи функція розподілу. Незалежно від складності об'єкт (елемент, система, складна система з резервуванням) має певну функцію розподілу наробітку (модель відмов), і вся проблема оцінки показників надійності об'єкта зводиться до оцінки параметрів цього розподілу.

*Модель відмов*¹ (функція розподілу) $F(t)$ і *модель надійності*² (імовірність безвідмовної роботи) $P(t)$ зв'язані співвідношенням $F(t) + P(t) = 1$.

Моделі відмов розділяються на *строго імовірнісні моделі відмов* та *імовірнісно-фізичні*. В якості строго імовірнісних моделі використовують розподіли: експоненційний (показниковий), логарифмічно нормальний, Вейбулла, нормальний тощо.

Імовірнісно-фізичні засновані на дослідженні кінетики³ фізичних процесів деградації об'єкта і призводять до двопараметричних розподілів.

Імовірнісно-фізичні моделі відмов отримують на підставі аналізу фізичних процесів деградації, що відбуваються в об'єкті та призводять до виникнення відмови. Переважно використовують такі розподіли: віяловий процес (α -розподіл), марковський монотонний процес (DM-розподіл), марковський немонотонний процес (DN-розподіл). Такі моделі відповідають широкому класу фізичних процесів деградації (втоми, зношування, корозії, старіння тощо). Усі зовнішні чинники, що визначають надійність і пов'язані з конструкцією, властивостями використовуваних матеріалів, технологією виготовлення, рівнем виробництва та експлуатації, зрештою впливають на середню швидкість процесів деградації та розсіювання реалізацій, не змінюючи схеми формалізації та типу розподілу. Тип же розподілу в розглядуваній схемі формалізації визначається характером фізичного процесу деградації, зокрема, детермінованим, монотонним або немонотонним видом його реалізацій.

¹ Модель відмов – це математична модель у вигляді функції розподілу відмов чи імовірності появи відмови у заданий момент часу (функція розподілу наробітку до відмови).

² Модель надійності – математична модель, що встановлює зв'язок між показниками надійності об'єкта, характеристиками надійності елементів, його структурою та параметрами процесу функціонування об'єкта.

³ Кінетика процесу – це закономірність розвитку фізичного процесу в часі, яка описує, як саме змінюється стан матеріалу або елемента об'єкта й з якою інтенсивністю прогресує деградація (зношування, старіння, утворення мікропошкоджень тощо).

Таким чином, строго імовірнісні моделі (розподіл експоненційний, логарифмічно нормальний, нормальний, Вейбулла) не пов'язані з фізичними явищами, що приводять до формування розподілу відмов, тобто ці моделі не мають фізичного обґрунтування, а імовірнісно-фізичні моделі (DM-, DN-, α -розподілу), спеціально побудовані для опису відмов об'єктів на основі аналізу фізичних процесів деградації, що призводять до відмов, на відміну від суворо імовірнісних моделей, є фізично обґрунтованими моделями, що враховують фізичну природу відмов і дають змогу використовувати характеристики фізичних явищ, що мають місце в об'єкті, для оцінювання надійності.

Побудова моделі надійності передбачає визначення *аналітичного виразу* для імовірності безвідмовної роботи об'єкта. В цьому разі модель надійності системи встановлює залежність імовірності безвідмовної роботи системи від показників надійності (імовірності безвідмовної роботи чи інших показників надійності) елементів з урахуванням структури (виду структурної схеми надійності) системи. У свою чергу, модель надійності елементів, наприклад, зношуваних механічних об'єктів встановлює залежність безвідмовної роботи елемента від параметрів процесу зношування; механічних елементів, які руйнуються під дією статичних чи циклічних навантажень, – від напруження та міцності тощо.

Встановлення аналітичного виразу функції розподілу випадкових величин (наробітку, ресурсу тощо) дозволяє визначити необхідні показники надійності (середні та гамма-процентні показники, імовірність безвідмовної роботи тощо). У цьому разі вибір цієї чи іншої теоретичної моделі відмов обумовлює певну точність одержуваних кількісних показників надійності. Методичні похибки оцінок показників надійності, притаманні певним моделям, можуть мати вельми суттєве значення.

Вибір моделі відмов, тобто визначення аналітичного виразу функції розподілу проводять на підставі аналізу:

- статистичних даних наробітків до відмови (ресурсу чи збережаності);
- фізичних процесів деградації, які спричиняють відмову (граничний стан).

Перший підхід встановлення закономірностей появи відмов полягає у притягненні деяких розподілів випадкових величин, які відомі у теорії імовірностей як моделі відмов. У цьому разі відмови розглядають як абстрактні випадкові події, а моделі відмов називають *імовірнісними (статистичними)*. Такі моделі встановлюють зв'язок імовірності появи відмови з наробітком.

Другий підхід до встановлення закономірностей появи відмов здійснюється на підставі аналізу статистичних закономірностей протікання фізичних процесів, які спричиняють відмови. Цей підхід спричиняє моделі відмов, які спеціально побудовані для опису явища, що вивчається. У цьому випадку параметри розподілу мають конкретну фізичну інтерпретацію, а моделі відмов називають *імовірнісно-фізичними*. Такі моделі які встановлюють зв'язок імовірності появи відмови (показників надійності) з характеристиками фізичних процесів деградації, що спричиняють відмову.

Повний життєвий цикл будь-якого об'єкта (розробка-виробництво-експлуатація) супроводжується комплексом завдань з оцінки його надійності: розрахунок показників надійності на ранніх етапах проектування, підтвердження досягнутого рівня надійності експериментальними методами на кінцевих етапах проектування і виробництва, визначення норми запасних частин для забезпечення надійності в процесі експлуатації. Рішення цих завдань передбачає використання цієї чи іншої моделі відмов, яка забезпечує, по-перше, рішення цих завдань та, по-друге, збіжність результатів під час визначення розрахункових та експериментальних оцінок.

Функція розподілу, що застосовується у якості моделі відмов, повинна дозволити вирішувати наступні основні завдання надійності:

- розрахунок показників безвідмовності невідновлюваних систем (середнього та гамма-відсоткового наробітку до відмови, імовірності безвідмовної роботи за будь-який заданий час);
- розрахунок показників безвідмовності відновлюваних систем (середнього наробітку на відмову чи параметра потоку відмов) на будь-який інтервал і момент експлуатації об'єкта;
- розрахунок довговічності (терміну служби) систем;
- розрахунок комплексних показників надійності систем (коефіцієнта готовності, коефіцієнта оперативної готовності);
- розрахунок норм запасних частин;
- планування визначальних та контрольних випробувань на надійність;
- оброблення та отримання оцінок (точкових та інтервальних) показників надійності за експериментальними даними.

Виходячи з мети та завдань аналізу надійності до функцій розподілу, які застосовуються як моделі відмов, ставляться такі *основні вимоги*.

1) *Фізичність*. Урахування фізичної природи та причин відмов є основою формування моделей відмов і сприяє ефективному розв'язанню задач надійності. В умовах обмеженого часу та нестачі статистичних

даних основним критерієм вибору моделі є її фізичне обґрунтування, тобто здатність відображати причинно-наслідкові зв'язки, механізми деградації, умови навантаження та іншу наявну апіорну інформацію. Навіть за наявності достатньої статистики фізична обґрунтованість залишається важливим чинником прийняття рішень, а за її відсутності — єдиним можливим підґрунтям для вибору моделі.

2) *Адекватність*. Функція розподілу як модель відмов має бути адекватною, тобто точно відображати різні форми розподілу з реальними значеннями варіації, асиметрії та ексцесу. Більш адекватні моделі забезпечують точніші оцінки надійності та зменшують витрати на випробування і збір статистичних даних.

Адекватність моделі зазвичай забезпечують функції розподілу з двома і більше параметрами (за винятком нормального розподілу). Перевагу слід надавати тим, що точніше описують хвости розподілу — початкову та кінцеву частини. Узагальненою та достатньо інформативною характеристикою розподілу є функція інтенсивності відмов. Емпірична інтенсивність має немонотонний характер¹ із кінцевим значенням, тому подібна поведінка теоретичної функції вказує на відповідність моделі реальному розподілу.

3) *Можливість виконання розрахунку надійності систем*. Ключовим завданням надійності є розрахунок і прогноз показників на всіх етапах життєвого циклу системи – від технічного завдання до виготовлення. Тому важливо, щоб функція розподілу, як модель відмов, дозволяла проводити такі розрахунки. Вона має забезпечувати можливість оцінки надійності системи за відомими характеристиками її складових і бути придатною для застосування єдиного математичного апарату на всіх етапах проєктування, виробництва й експлуатації.

Розрахунок безвідмовності відновлюваних систем можливий лише за умови використання функції розподілу, яка має властивість згортання. Серед відомих у теорії надійності розподілів цю властивість мають лише експоненційний, нормальний та ДМ-розподіли.

4) *Універсальність*. Універсальність моделі відмов визначається кількістю показників надійності, які вона дозволяє оцінювати, та різноманітністю методів їх розрахунку. Щоб забезпечити узгодженість між розрахунковими й експериментальними оцінками, функція розподілу

¹ Немонотонний характер процесу – це коли зміни в стані об'єкта йдуть не рівно в один бік. Іноді стан може погіршуватися, а іноді – покращуватися або стабілізуватися. Наприклад, після невеликого ремонту механізм може працювати краще, а не гірше. Такі процеси важче передбачити, тому що вони не йдуть тільки вгору або тільки вниз, а змінюють свій напрямок.

як модель відмов повинна забезпечувати можливість вирішення всіх необхідних завдань надійності, що зазначені вище.

Одна з важливих властивостей функції розподілу, що розширює її прикладне застосування, – це здатність до згортання. Вона дає змогу розраховувати безвідмовність і довговічність відновлюваних систем, визначати норми запасних частин та вирішувати інші пов'язані завдання. Крім того, можливість оцінювання параметрів розподілу на основі статистики відмов, даних про деградацію та іншої апіорної інформації підвищує універсальність моделі.

5) *Практична придатність*. У технічних розрахунках важливо, щоб функції розподілу мали прості аналітичні форми та зручні у використанні вирази для основних характеристик і параметрів. Найкраще цій вимозі відповідають розподіли з невеликою кількістю параметрів або ті, що описуються через добре відомі та табульовані функції.

9.3. Моделі раптових відмов

9.3.1. Модель миттєвої відмови

Математичний опис процесів, пов'язаних із виникненням раптових відмов, можна розглянути для періоду нормальної експлуатації виробів (див. рис. 9.1), коли інтенсивність відмов практично постійна. Відмови виникають у момент стрибкоподібної зміни одного або декількох основних параметрів об'єкта. Це може бути випадкове перевищення механічного або електричного навантаження, внаслідок чого спостерігаються руйнування елементів механічних систем або електричний пробій ізоляційних матеріалів. За різкого збільшення електричної напруги спостерігаються випадки пробою напівпровідникових елементів (діодів, тиристорів, тріодів та ін.), які застосовуються в конструкціях рухомого складу. Але оскільки математичне трактування в цьому разі не залежить від конкретних фізичних процесів відмов, математичний опис моделі раптових відмов можна розглянути на прикладі, що характеризує порушення механічної міцності елемента конструкції.

Елемент має певну механічну міцність σ_r , що забезпечує його працездатність під час впливу механічних навантажень $\sigma(t)$, які не перевищують величину межі міцності, як показано на рис. 9.2.

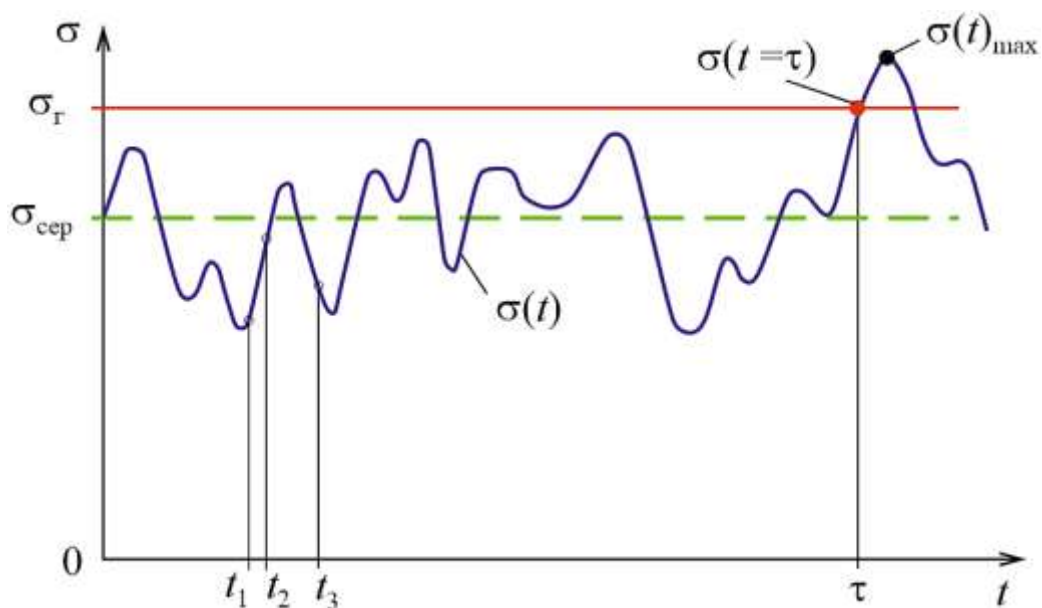


Рис. 9.2. Модель миттєвої відмови

Усі однотипні об'єкти в експлуатації здатні витримати деяке гранично допустиме навантаження σ_r . Ця здатність вважається незмінною протягом усього часу експлуатації, тобто $\sigma_r = \text{const}$. Інакше кажучи, попереднє використання кожного об'єкта не впливає на властивості об'єкта в його подальшій експлуатації. Навантаження, що діє на об'єкт, безперервно, відносно плавно і випадковим чином змінюється, як це зображено на рис. 9.2. Нехай ця зміна характеризується властивостями асимптотичної незалежності та стаціонарності.

Властивістю асимптотичної незалежності навантаження $\sigma(t)$ володіє в тому разі, якщо $\sigma(t_3)$ не залежить від $\sigma(t_1)$ за доволі великої тривалості часу між моментами t_3 і t_1 , тобто при великій різниці $(t_3 - t_1)$, але $\sigma(t_2)$ явно пов'язане з $\sigma(t_1)$ при малих різницях $(t_2 - t_1)$. Це означає, що моменти «пікових» навантажень не можуть бути передбачені заздалегідь.

Відсутність спрямованості зміни навантаження $\sigma(t)$ у міру наростання часу роботи є властивістю стаціонарності. Середній рівень навантаження $\sigma_{\text{сер}}$ не змінюється з часом, залишається постійним для всіх об'єктів, що перебувають в експлуатації.

У цих умовах навантаження можливий випадок, коли навантаження в одному з «піків» перевищує допустимий рівень σ_r і за умови $\sigma(t = \tau) > \sigma_r$ настане відмова об'єкта. Очевидно, що час до першого

перетину τ буде величиною випадковою внаслідок зазначених властивостей асимптотичної незалежності та стаціонарності навантаження. Тут τ – час безвідмовної роботи об'єкта.

Якщо розділити період розглянутого проміжку часу на однакові інтервали Δt і припустити, що імовірність появи пікового руйнівного навантаження в кожний момент часу є однаковою, що впливає з особливостей випадкового процесу навантаження, то, очевидно, випадкові події появи пікового навантаження на кожному інтервалі часу Δt також можна вважати рівноімовірними. Фізично це означає, що середня кількість пошкоджень (відмов) елемента в будь-якому інтервалі залишатиметься постійною.

Раніше було встановлено, що величина, яка характеризує кількість відмов в обраному інтервалі часу, якщо до цього інтервалу деталь працювала безвідмовно, називається інтенсивністю відмов λ . У розглянутій ситуації величина λ залишається постійною.

Такій умові відповідає *експоненційний закон розподілу* часу роботи деталі до відмови, який і приймають як математичну модель.

Характерною властивістю експоненційного розподілу є те, що імовірність безвідмовної роботи на інтервалі Δt – $P(\Delta t)$ не залежить від тривалості t попереднього інтервалу наробітку, на якому відмови не сталося, а залежить тільки від тривалості інтервалу наробітку Δt .

9.3.2. Модель миттєвих відмов із порогом чутливості

Оскільки насправді більшість елементів протягом часу втрачають свої первісні властивості, то в теорії надійності запропоновано більш реальні схеми, які добре описуються експоненційним розподілом. Так, наприклад, об'єкти можуть забезпечувати умову $\lambda = \text{const}$ не впродовж усього терміну служби, а впродовж періоду напруження після закінчення припрацювання $l_{\text{пр}}$ до моменту настання моменту старіння $l_{\text{зн}}$ (див. рис. 9.1). Якщо такі об'єкти встановлюють для експлуатації в технічній системі після періоду припрацювання і використовують тільки протягом наробітку $(l_{\text{зн}} - l_{\text{пр}})$, то час безвідмовної роботи таких об'єктів під час експлуатації системи розподілятиметься за експоненційним законом.

В експлуатації міцнісні властивості об'єкта протягом часу знижуються. Якщо таке зниження міцнісних властивостей відбувається за малий проміжок часу, то закон розподілу за формою змінюється.

Описана вище ситуація представлена на рис. 9.3. Це може бути зниження механічної міцності внаслідок утворення і зростання втомної тріщини або різке зниження електричної міцності ізоляційних матеріалів електричних апаратів, що було пов'язано з підвищеними тепловими навантаженнями або зволоженням.

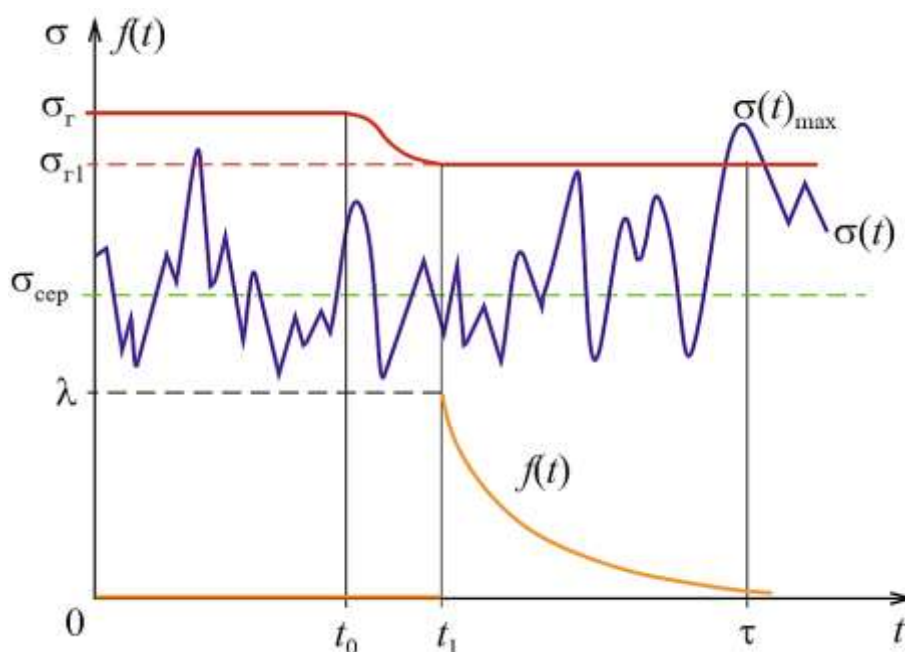


Рис. 9.3. Модель миттєвих відмов із порогом чутливості

До моменту часу t_0 гранично допустиме навантаження $\sigma_r > \sigma(t)_{\max}$ і імовірність відмови мала. У проміжок часу $(t_0 - t_1)$ відбулося зниження міцнісних властивостей до рівня σ_{r1} , за якого стає відчутною імовірність ушкодження об'єкта піками навантаження $\sigma(t)_{\max}$.

Закон розподілу, що відповідає цієї моделі, можна записати у вигляді:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda(t-t_1)}, & t \geq t_1 \\ 0, & t < t_1 \end{cases}. \quad (9.3)$$

Цей двопараметричний розподіл з параметрами (λ, t_1) називається експоненційним з порогом чутливості, оскільки параметр t_1 характеризує деякий «порог», до якого об'єкт «не відчуває» навантаження.

У теорії надійності зазначається також, що експоненційний розподіл є граничною статистичною моделлю часу безвідмовної роботи системи з великим числом послідовно з'єднаних у структурній схемі надійності елементів. Кожен з елементів не повинен чинити істотно великого впливу на імовірність відмови системи і не обов'язково повинен мати експоненційний розподіл часу безвідмовної роботи.

Розглянуті моделі характерні для конструкційних відмов, коли можна припустити, що всі екземпляри достатньо однорідні за своїми властивостями. Порушення технології в більшості випадків погіршує якість окремих екземплярів або їхніх окремих груп. Очевидно, що й інтенсивність відмов кожної з утворених груп буде різною: виготовлених за нормальною технологією λ_1 за частки їх у загальній масі ε , виготовлених із порушеннями технології λ_2 за частки $(1 - \varepsilon)$.

Густина розподілу часу безвідмовної роботи для всіх об'єктів виначатиметься формулою:

$$f(t) = \varepsilon \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1 - \varepsilon) \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad (9.4)$$

виведеною на основі зазначених припущень і оцінки імовірності відмов груп.

Підбиваючи підсумок розглянутої моделі миттєвого пошкодження, слід зробити висновок, що така схема формування потоку відмов в ідеальному випадку заперечує необхідність виконання профілактичних заміन елементів або їхнього періодичного ремонту. Оскільки причиною відмови є зовнішній випадковий вплив, а властивості елементів незмінні, то заміна старого елемента новим не змінює моменту настання відмови під час піку навантаження. Підвищення надійності в цьому випадку можна досягти поліпшенням конструкції, тобто збільшенням рівня властивостей виробу σ_r або зниженням рівня піків зовнішніх впливів $\sigma(t)_{\max}$.

Приклад 9.1. У результаті випробування десяти паливних насосів отримано величини напрацювання їх до відмови: 410; 430; 520; 600; 670; 700; 840; 1200; 1660; 1840 год. Вважаючи наробіток до відмови паливних насосів таким, що підкоряється експоненційному закону розподілу, необхідно оцінити величину інтенсивності відмов, а також розрахувати імовірність безвідмовної роботи за перші 500 год і імовірність появи відмови в проміжку часу між 800 і 900 год роботи дизеля.

Розв'язання. Визначається величина середнього наробітку насосів до відмови

$$T_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{10} t_i = \frac{410 + 430 + 520 + 600}{10} + \frac{670 + 700 + 840 + 1200 + 1660 + 1840}{10} = 887 \text{ год.}$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{сер}}} = \frac{1}{887} = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Величина імовірності безвідмовної роботи насосів за наробітком 500 год

$$P(500) = \exp(-\lambda t) = \exp(-1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 500) = 0,57.$$

Імовірність появи відмов у проміжку між $t_1 = 800$ год $t_2 = 900$ год роботи насосів становитиме

$$\begin{aligned} P(t_1 < t < t_2) &= F(t_2) - F(t_1) = [1 - \exp(-\lambda t_2)] - [1 - \exp(-\lambda t_1)] = \\ &= [1 - \exp(-1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 900)] - [1 - \exp(-1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 800)] = 0,043. \end{aligned}$$

9.4. Аналіз закономірностей, що описують процеси зношування, старіння і втомного пошкодження деталей і вузлів рухомого складу

До причин виникнення поступових відмов і пошкоджень більшості елементів конструкцій рухомого складу можна віднести втому металів, старіння, залишкові деформації, корозію та основну причину – зношування поверхонь тертя.

Втома характеризується виникненням і поступовим розвитком у металі тріщин під впливом багаторазово повторюваних змінних наван-

тажень. Втомний злам, як правило, крихкий без видимих слідів пластичної деформації. Це пов'язано з тим, що макро- і мікротомні пошкодження без спеціальної апаратури в умовах експлуатації виявити дуже важко, а магістральна тріщина, що виросла з них, доводить деталі до руйнування за навантажень, значно менших за розрахункові.

До втомних руйнувань піддаються колінчасті вали, елементи конструкції рам візків, осі колісних пар, елементи пружного підвішування, зубчасті колеса, корінні підшипники, шатуни і пружини клапанів дизелів.

Старінню найчастіше піддаються деталі, виготовлені з неметалевих матеріалів. З плином часу під впливом довкілля та умов експлуатації (кисню повітря, низьких температур, різких температурних перепадів, вологості) відбувається зміна їхніх фізико-механічних властивостей. Це призводить до зниження міцності, еластичності, появи поверхневих тріщин ізоляції електричних машин і апаратів, а також гумових і гумо-металевих деталей.

Залишкові деформації, які є також однією з причин порушення працездатності, виникають у разі великих тисків на поверхні деталі або під час впливу навантажень, що викликають напруження за межею пружності. У першому випадку з'являється зминання поверхонь, а в другому – скручування або вигин.

Зминання поверхонь зазнають деталі, що працюють в умовах значних навантажень за відсутності відносного зміщення їх поверхонь (бобишки під головки болтів і гайок, шпонкові з'єднання тощо). Скручування і вигин під впливом високих напружень відбуваються на валиках приводів, шатунах тощо.

Під час релаксації внутрішніх напружень також виникають остаточні деформації, які зазвичай називають викривленням. Це явище відзначається в зварних блоках циліндрів та інших корпусних деталях.

Корозія завжди супроводжує взаємодію поверхонь, що труться, причому механізм її розвитку визначається властивістю середовища, матеріалом пар, що труться, температурними та іншими факторами.

Як правило, всі розглянуті вище фактори, що сприяють поступовій втраті елементом працездатності, діють не ізольовано, а в сукупності. Тому в загальному випадку під зносом розуміють залишкові зміни фізичного стану деталей не тільки від тертя, а й від інших факторів (втома, корозія, старіння тощо). Таким чином, поступове зношування являє собою накопичення ушкоджень у різних частинах деталей і зниження загального рівня працездатності. Тому на відміну від раптових відмов, коли перше перевищення межі міцності призводить до відмови елемента, у випадку з поступовими відмовами потрібне інтегрування

елементарних ушкоджень у різних його частинах, зумовлених впливом багатьох факторів, які мають випадковий характер і призводять до поступової зміни стану об'єкта, тобто, під час аналізу використовують деяку узагальнену залежність $x(t)$, яка характеризує зміну робочих властивостей виробу від часу або наробітку. Зазначена випадкова функція $x(t)$ у загальному випадку має нелінійний характер.

Наприклад, періодично вимірюючи глибину зношеного шару матеріалу, можна для кожного підшипника, поставленого під спостереження, отримати свою криву або реалізацію зносу. Перетин такою реалізацією допустимої величини зносу $x_{\max}$, як показано на рис. 9.4, свідчить про вичерпання підшипником терміну служби.

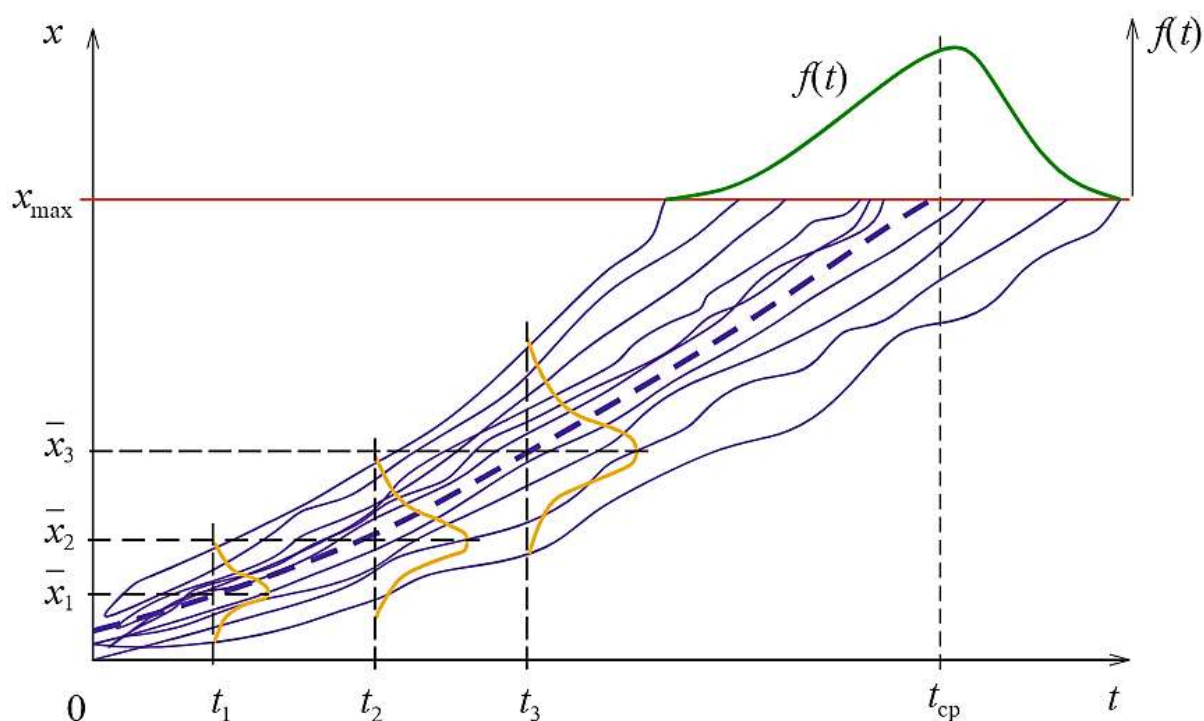


Рис 9.4. Схема формування поступової відмови елемента в разі нелінійної залежності швидкості зміни параметру x у часі

Очевидно, що лінії зносу для різних підшипників однієї серії не збігатимуться, оскільки всі вони різняться не тільки якістю матеріалу та розмірами (у межах технологічних допусків), а й умовами експлуатації. Причина розсіювання швидкостей зносу полягає ще й у тому, що швидкість нагромадження пошкоджень γ – це функція кількох випадкових аргументів

$$\gamma = \frac{dx}{dt} = \varphi(P, v, K_t, K_e), \quad (9.5)$$

де P – навантаження;
 v – швидкість;
 K_t – технологічні фактори;
 K_e – експлуатаційні фактори.

Кожен із зазначених аргументів, будучи випадковим і маючи певний ступінь розсіювання, впливає на строк служби кожного підшипника, спричиняючи розсіювання строків служби відповідно до закономірностей, характерних для випадкових величин (див. рис. 9.4.). Таким чином, унаслідок впливу зазначених випадкових факторів отримуються статистичні дані про величини ресурсів кожного окремого підшипника та є можливість сформулювати закон розподілу $f(x, t)$, який визначає імовірність виходу параметра X за межу $X_{\max}$, що відповідає імовірності відмови.

Велике значення для вибору виду функції розподілу $f(t)$ або, що те ж саме, математичної моделі, яка описує статистичним чином процес поступової відмови деталі або елемента, має вигляд середньої лінії $x(t)$, що проходить через точки математичних сподівань величин зносу за різних напрацювань, як показано на рис. 9.4 – товста штрихова лінія. Оскільки ця лінія відображає в усередненому вигляді характер зміни всіх аналізованих реалізацій зносу, то вона може бути прийнята у вигляді функції інтенсивності відмов елемента від зносу $\lambda(t)$. Орієнтуючись на вигляд теоретичних функцій інтенсивності відмов, характерних для різних законів розподілу, і порівнюючи їх з експериментально отриманою усередненою залежністю зміни інтенсивності наростання зносу деталі, що аналізується, можна вибрати математичний вираз для конкретного закону розподілу часу безвідмовної роботи, притаманного тим чи іншим елементам конструкції. Деякі з використовуваних теоретичних функцій інтенсивності відмов наведено на рис. 9.5.

Якщо інтенсивність збільшується пропорційно часу роботи, то розподіл напрацювання виробу до відмови описується законом розподілу Релея. Коли інтенсивність відмов елемента зростає з часом, але є деяка межа, то виходить закон розподілу Ерланга.

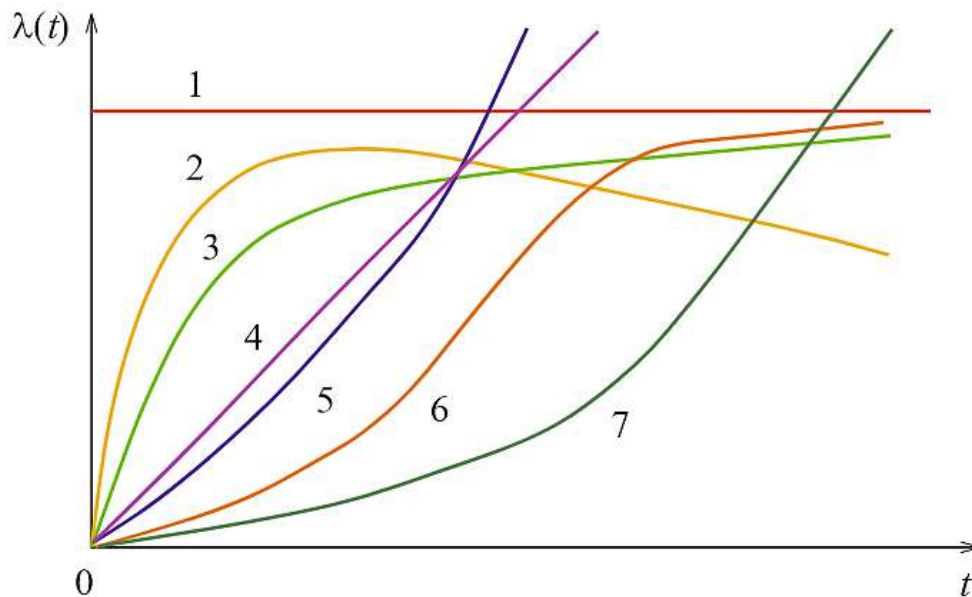


Рис. 9.5. Види функцій інтенсивності відмов для різних законів розподілу:
 1 – експоненційного (показникового); 2 – логарифмічно-нормального; 3 – Ерланга;
 4 – Релея; 5 – Вейбулла-Гнеденка; 6 – гамма-розподілу; 7 – нормального

Якщо інтенсивність відмов пов'язана з наробітком нелінійно за деякою степеневою залежністю, то отримаємо нормальний закон розподілу або закон розподілу Вейбулла-Гнеденко. Якщо середня швидкість зносу постійна, то для опису поступової відмови може бути використано гамма-розподіл часу безвідмовної роботи. У разі поступового зменшення швидкості зносу після періоду припрацювання, у якості моделі може бути використано логарифмічно-нормальний розподіл.

9.5. Основні закони розподілу наробітку до відмови, що використовуються в теорії надійності

Статистичний підхід до вибору моделі відмов і оцінювання надійності передбачає наявність достатнього обсягу даних про відмови об'єктів відповідного типу. У межах імовірнісної концепції вибір типу розподілу зводиться до обґрунтованого застосування одного з відомих законів розподілу випадкових величин, що найкраще відповідає наявним даним згідно зі статистичними критеріями.

На відміну від раптових (миттєвих) відмов, в яких застосовується експоненційний закон розподілу наробітку на відмову, під час моделювання

поступових відмов деталей машин найчастіше використовують такі закони розподілу наробітку до відмови: нормальний (Гауса), логарифмічно-нормальний, Вейбулла-Гнеденка, гамма-розподіл і Релея.

9.5.1. Експоненційний (показниковий) закон розподілу

В навчальній літературі експоненційний розподіл іноді називають «*основним законом надійності*», маючи на увазі його простоту та широке застосування на етапі нормальної експлуатації, тобто застосування експоненційного розподілу є коректним лише за умови відсутності старіння та деградаційних процесів.

Зміна показників надійності у разі розподілу за експоненційним законом наведена на рис. 9.6.

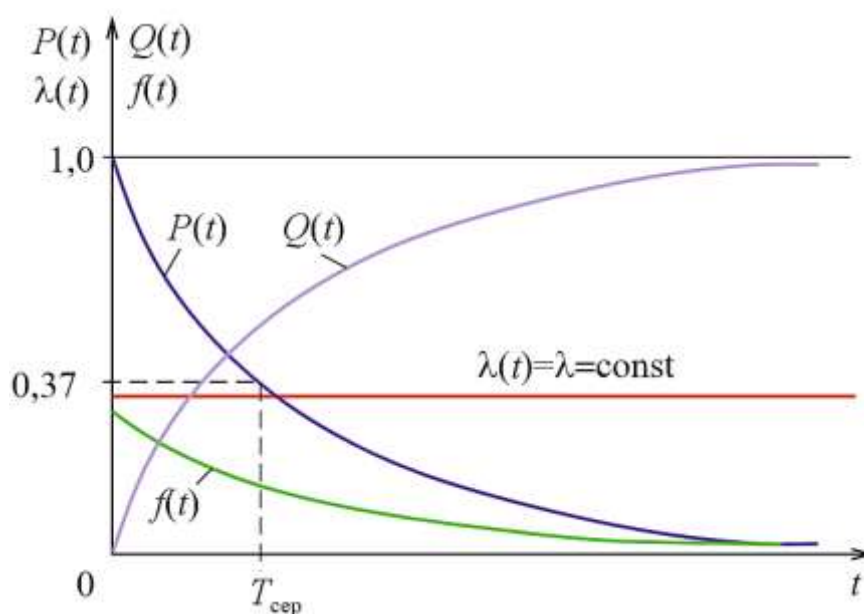


Рис. 9.6. Зміна показників надійності протягом наробітку при експоненційному законі розподілу

Густина розподілу імовірності відмов $f(t)$, не пов'язана зі старінням матеріалу, записується у вигляді:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t); \quad (9.6)$$

— розподіл імовірності відмови (імовірність відмови)

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t); \quad (9.7)$$

– розподіл імовірності безвідмовної роботи

$$P(t) = \exp(-\lambda t); \quad (9.8)$$

– математичне сподівання часу безвідмовної роботи – середній наробіток на відмову

$$T_{\text{сер}} = \frac{1}{\lambda}; \quad (9.9)$$

– дисперсія наробітку до відмови (на відмову)

$$D[t] = \frac{1}{\lambda^2}; \quad (9.10)$$

– середньоквадратичне відхилення наробітку на відмову

$$\sigma = \sqrt{D[t]} = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2}} = \frac{1}{\lambda} = T_{\text{сер}}. \quad (9.11)$$

Отже, за експоненційного закону розподілу математичне сподівання наробітку до відмови $T_{\text{сер}}$ чисельно дорівнює середньому квадратичному відхиленню σ . Умова $\sigma = T_{\text{сер}}$ є характерною ознакою експоненційного закону і цю властивість часто використовують на практиці для перевірки істинності гіпотези про існування експоненційного закону надійності.

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта за наробітком $t = T_{\text{сер}}$ за експоненційним законом розподілу становитиме

$$P(t = T_{\text{сер}}) = e^{-\lambda T_{\text{сер}}} = e^{-\frac{\lambda}{\lambda}} = e^{-1} \approx 0,367. \quad (9.12)$$

Із цього виразу випливає, що за експоненційного закону середній наробіток до відмови є наробітком, протягом якого імовірність безвідмовної роботи зменшується в $e \approx 2,718$ разів.

Значення функції надійності $P(t) \approx 0,367$ за наробіток $t = T_{\text{сер}}$ означає, що до моменту $T_{\text{сер}}$ зі 100 однотипних об'єктів у середньому приблизно 37 % пропрацюють без відмови, а 63 % відмовлять.

Звідси можна зробити важливий висновок: за експоненційного розподілу близько 63 % відмов виникає до напрацювання $t = T_{\text{сер}}$ і тільки 37 % відмов – пізніше. Тому надійну роботу об'єктів можна забезпечити тільки для інтервалу наробітку, значно меншого за $T_{\text{сер}}$.

Інтенсивність відмов становитиме

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\lambda \exp(-\lambda t)}{\exp(-\lambda t)} = \lambda = \text{const.} \quad (9.13)$$

Умова $\lambda = \text{const}$ – важлива особливість експоненційного закону розподілу. Це означає, з одного боку, що імовірність відмови не залежить від того, скільки елемент працював раніше, так само як і залишковий час роботи елемента не залежить від попереднього наробітку. Але, з іншого боку, ця умова повністю характеризує ступінь застосовності експоненційної моделі раптових відмов. Вона не може бути використана для елементів, у процесі експлуатації яких відбуваються незворотні фізичні та хімічні процеси зносу і старіння. Таким чином, це ідеалізована модель.

Таким чином, експоненційний розподіл характеризується такими основними властивостями.

1. Розподіл визначається одним параметром λ , який повною мірою характеризує надійність об'єкта.

2. Інтенсивність виникнення відмов λ не залежить від інтервалу наробітку t і є величиною постійною.

3. Математичне сподівання наробітку до відмови чисельно дорівнює середньому квадратичному відхиленню.

4. Імовірність безвідмовної роботи об'єкта однакова для однакових за величиною інтервалів наробітку Δt у межах періоду нормальної експлуатації і не залежить від тривалості попереднього періоду $(0, t)$. Це означає, що надійність (імовірність безвідмовної роботи) об'єкта, наприклад, для першої тисячі кілометрів пробігу буде такою ж, як і для наступної тисячі кілометрів.

9.5.2. Нормальний розподіл (розподіл Гауса)

Нормальний розподіл (розподіл Гауса) посідає особливе місце і відіграє дуже важливу роль у теорії надійності. Головна його особливість полягає в тому, що він є граничним розподілом, до якого наближаються інші закони розподілу. Розподіл завжди підпорядковується нормальному закону, якщо на зміну випадкової величини впливають багато приблизно рівнозначних факторів, дія яких підсумовується. Основне обмеження, що накладається на підсумовування випадкових величин, полягає в тому, щоб усі величини в загальній сумі мали відносно мале значення. Якщо ця умова не виконується й одне з випадкових значень різко превалює в сумі над усіма іншими, то це впливає на суму й деформує симетричність розподілу.

Нормальний закон розподілу є основним розподілом математичної статистики і використовується в теорії надійності як статистична модель для опису поступових (зносних) відмов, коли коефіцієнт варіації v не перевищує 0,3–0,4, тобто модель нормального закону розподілу добре описує відмови, що виникають в елементах конструкції рухомого складу у процесі зношування, втоми та корозії деталей, які працюють у номінальних (розрахункових) режимах навантаження.

Густина імовірності нормального закону розподілу визначається за формулою:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - M[t])^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (9.14)$$

На відміну від експоненційного, вид якого визначається тільки одним параметром λ , нормальний закон розподілу двопараметричний. Його параметрами є математичне сподівання $M[t]$, і середньоквадратичне відхилення σ .

Аналітичні залежності для:

– функції розподілу імовірностей нормального закону – інтегральна функція розподілу наробітку до відмови (імовірність відмови за наробіток t)

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[-\frac{(t - M[t])^2}{2\sigma^2} \right] dt; \quad (9.15)$$

– диференціальної функції нормального розподілу наробітку до відмови (густина імовірності відмов)

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-M[t])^2}{2\sigma^2}\right]; \quad (9.16)$$

– функція надійності (імовірність безвідмовної роботи за наробіток t)

$$\begin{aligned} P(t) = 1 - F(t) &= 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-M[t])^2}{2\sigma^2}\right] dt = \\ &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-M[t])^2}{2\sigma^2}\right] dt; \end{aligned} \quad (9.17)$$

– інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\exp\left[-\frac{(t-M[t])^2}{2\sigma^2}\right]}{\int_t^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-M[t])^2}{2\sigma^2}\right] dt}. \quad (9.18)$$

Формули (9.15–9.18) справедливі для періоду інтенсивного зносу (старіння) (див. рис. 9.1), який характеризується зростанням інтенсивності відмов порівняно з періодом нормальної експлуатації. У цей період $(l_{\text{зн}}, \infty)$ в об'єктах відбуваються необратимі фізико-хімічні явища, вони старіють і відповідно зростає інтенсивність зносу. У разі використання нормального розподілу передбачається, що експлуатація об'єктів починається з наробітку $l = l_{\text{зн}}$ ($t = t_{\text{зн}}$).

Також необхідно зазначити, що у формулі (9.15) для визначення імовірності відмови $F(t)$ нижня границя інтегрування дорівнює $-\infty$, що не має сенсу при оцінці надійності, оскільки об'єкти включаються в роботу з моменту $l = 0$ ($t = 0$), а не $l = \infty$ ($t = \infty$). Цю незручність можна подолати, якщо виразити $F(t)$ через $P(t)$. Тоді

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_t^{\infty} f(t) dt,$$

де нижня границя інтегрування дорівнює t .

Характерні особливості зміни функцій $f(t)$, $P(t)$ і $\lambda(t)$ наведено на рис. 9.7.

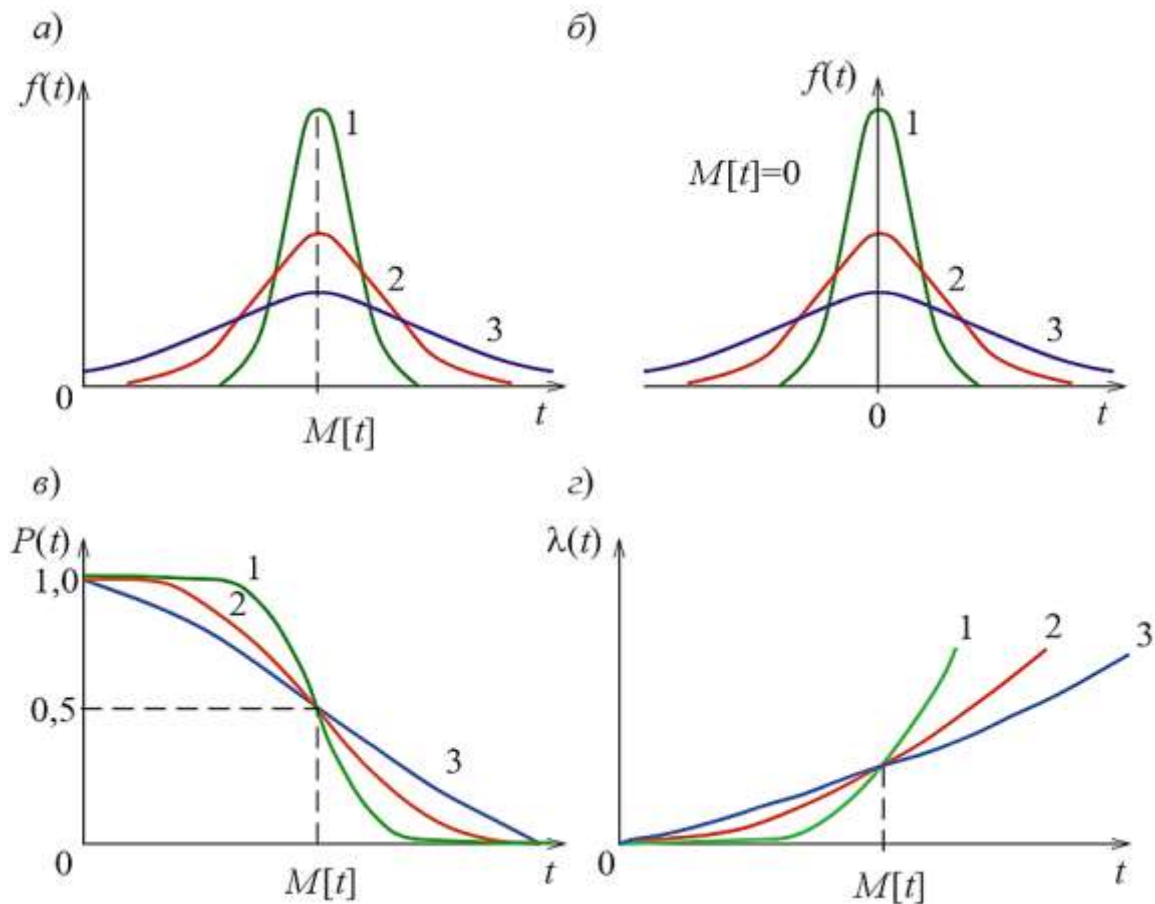


Рис. 9.7. Графіки функції розподілу імовірностей нормального закону за $M[t] = \text{const}$ та $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$:

а) густина розподілу; б) густина центрального розподілу ($M[t] = 0$);

в) імовірність безвідмовної роботи; г) інтенсивність відмов

Як випливає з рис. 9.7, а), крива густини імовірності нормального розподілу $f(t)$ має симетричний дзвоноподібний вигляд (вигляд симетричної петлі) із центром розподілу в точці $M[t]$. Це означає, що у разі нормального розподілу приблизно половина відмов виникає до момен-

ту, що відповідає значенню $M[t]$, і половина – після. Оскільки відмови групуються біля середнього значення наробітку об'єкта до відмови $M[t]$, то безвідмовну роботу можна забезпечити для досить великого інтервалу напрацювання, близького до значення $M[t]$.

Аналіз кривої інтенсивності зносів (див. рис. 9.7, з) показує, що інтенсивність зносових відмов зростає – спочатку повільно, а після досягнення напрацювання $M[t]$ швидше, що характерно для періоду зносу.

Основні параметри та властивості нормального розподілу. Величини $M[t]$ і σ прийнято називати параметрами нормального розподілу, що характеризують відповідно центр розподілу та його масштаб (див. рис. 9.7, а).

Якщо змінювати положення центру розсіювання $M[t]$, не змінюючи характеру розсіювання σ , то крива розподілу зміщуватиметься вздовж осі наробітку.

Параметр σ характеризує форму кривої розподілу: чим більше розсіювання (більше σ), тим менша максимальна ордината кривої. Оскільки площа під кривою розподілу повинна завжди залишатися такою, що дорівнює 1, то збільшення σ призводить до «розтягування» кривої вздовж осі абсцис.

Таким чином, математичне сподівання визначає на графіку положення петлі, а середнє квадратичне відхилення (СКВ) – ширину петлі. Крива густини розподілу тим гостріша і вища, чим менше σ . Основні властивості диференціальної функції нормального розподілу:

- функція визначена на всій осі t від $-\infty$ до $+\infty$;
- функція невід'ємна, і графік її розташований над віссю t ;
- графік функції симетричний відносно вертикальної прямої $t = M[t]$;

- функція має максимум при $t = M[t]$, що дорівнює $f_{\max}(t) = f(M[t]) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi})$, рис. 9.8;

- графік функції має точки перегину – точки переходу від опуклості до увігнутості – $(M[t] - \sigma)$ і $(M[t] + \sigma)$;

- зона розсіювання нормально розподіленої випадкової величини лежить у межах $M[t] \pm 3\sigma$, тобто в межах 6σ (правило 3σ – «трьох сігм»). Інакше, абсолютна величина відхилення нормально розподіле-

ної випадкової величини від математичного сподівання $M[t]$ не повинна перевищувати потрійного середньоквадратичного відхилення.

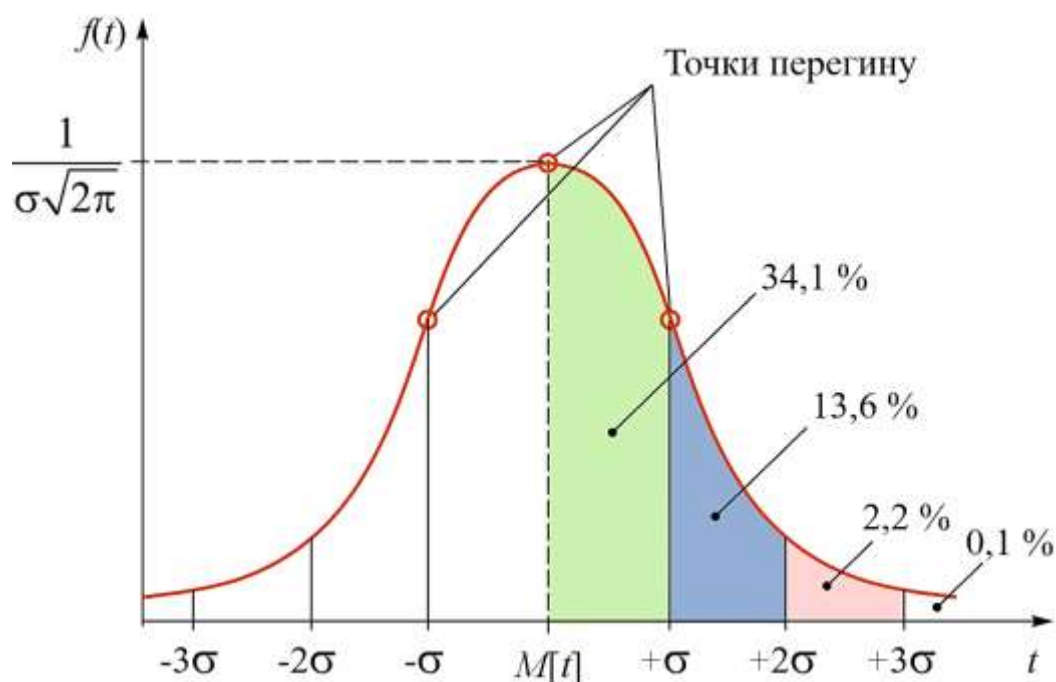


Рис. 9.8. До основних властивостей диференціальної функції нормального розподілу

Правило трьох СКВ полягає в тому, що якщо випадкова величина розподілена нормально, то абсолютна величина її відхилення від математичного сподівання не перевершує потрійного СКВ. Імовірність того, що абсолютна величина відхилення перевищить потроєне СКВ, дорівнює $0,002 = 0,2 \%$, тобто майже все розсіювання нормально розподіленої випадкової величини вкладається в інтервал $M[t] \pm 3\sigma$ (з точністю до часток відсотка).

Правило трьох СКВ дає змогу орієнтовно визначити інтервал практично можливих значень випадкової величини за відомим математичним сподіванням та СКВ або СКВ випадкової величини за максимальним практично можливим відхиленням від середнього значення.

В інтервалах $M[t] \pm \sigma$, $M[t] \pm 2\sigma$ і $M[t] \pm 3\sigma$ розташовано відповідно приблизно 68,2; 95,4 і 99,8 % площі під кривою нормального розподілу. Це означає, що шанси на те, що обрана випадковим чином нормально розподілена випадкова величина опиниться в інтервалі $M[t] \pm 3\sigma$, становить 998 до 1000.

Загалом, порівнюючи вироби з однаковим середнім напрацюванням до відмови $M[t]$ і різним середнім квадратичним відхиленням σ , можна стверджувати, що *чим менше σ , тим виріб кращий*.

Розрахунок імовірностей відмови та безвідмовної роботи на інтервалі Δt . Імовірність відмови в інтервалі наробітку $[t_1, t_2]$

$$F(t_1, t_2) = P[t_1 < T_{\text{сеп}} \leq t_2] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left[-\frac{(t - M[t])^2}{2\sigma^2}\right] dt. \quad (9.19)$$

Геометрично ця імовірність дорівнює площі під кривою функції $f(t)$ в інтервалі від t_1 до t_2 , рис. 9.9.

Зазначимо, що під час розрахунку за формулою (9.19) необхідно враховувати особливість.

Так, імовірність відмови об'єкта буде однакою і дорівнюватиме 2,2 % для однакових за величиною інтервалів наробітку $[M[t] - 3\sigma, M[t] - 2\sigma]$ та $[M[t] + 2\sigma, M[t] + 3\sigma]$, розташованих відповідно на початку та наприкінці розподілу, рис. 9.8. Однак ці імовірності не рівнозначні з точки зору надійності. Дійсно, імовірність відмови до початку першого інтервалу ($t = M[t] - 3\sigma$) буде $0,001 = 0,1 \%$, до початку другого інтервалу ($t = M[t] + 2\sigma$) – $0,977 = 97,7 \%$. Відповідно, імовірність безвідмовної роботи дорівнює $0,999 = 99,9 \%$ та $0,023 = 2,3 \%$.

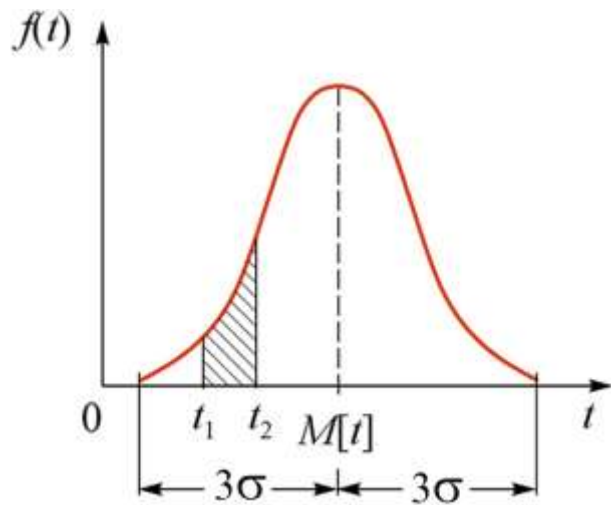


Рис. 9.9. Диференціальна функція нормального розподілу

Повна імовірність відмови за інтервал наробітку $[0, t + \Delta t]$ дорівнюватиме сумі імовірностей відмови об'єкта за інтервал наробітку $[0, t]$ та інтервал Δt , що примикає до моменту t .

Тоді повна імовірність відмови за інтервал наробітку $[0, M[t] - 2\sigma]$ становитиме $0,1 + 2,2 = 2,3 \%$, а за інтервал наробітку $[0, M[t] + 3\sigma]$ – $97,7 + 2,2 = 99,9 \%$. Відповідно імовірність безвідмовної роботи дорів-

нюватиме 97,7 % (100 – 2,3) і 0,1 % (100 – 99,9). Звідси, практично неріально, що об'єкт пропрацює до початку другого інтервалу.

Для точної оцінки імовірностей відмови і безвідмовної роботи за інтервал наробітку потрібно скористатися функціями $F(t)$ і $P(t)$.

Умовна імовірність безвідмовної роботи об'єкта в інтервалі наробітку Δt – $P(\Delta t)$ за умови, що об'єкт пропрацював безвідмовно до початку цього інтервалу, визначається за теоремою множення імовірностей як відношення імовірностей безвідмовної роботи наприкінці та на початку розглянутого інтервалу наробітку Δt . Так, для інтервалу наробітку $[M[t] - 3\sigma, M[t] - 2\sigma]$ $t = M[t] - 3\sigma$, $t + \Delta t = M[t] - 2\sigma$, $\Delta t = \sigma$. Тоді, $P(t) = 0,999$, $P(t + \Delta t) = 0,977$ і $P(\Delta t) = 0,977/0,999 = 0,978$.

Для інтервалу наробітку $[M[t] + 2\sigma, M[t] + 3\sigma]$, $t = M[t] + 2\sigma$, $t + \Delta t = M[t] + 3\sigma$, $\Delta t = \sigma$, $P(t) = 0,023$, $P(t + \Delta t) = 0,001$ і $P(\Delta t) = 0,001/0,023 = 0,043$. Відповідно, умовна імовірність відмови на інтервалі наробітку $[M[t] - 3\sigma, M[t] - 2\sigma]$ – $Q(\Delta t) = 1 - 0,978 = 0,022$, на інтервалі $[M[t] + 2\sigma, M[t] + 3\sigma]$ – $Q(\Delta t) = 1 - 0,043 = 0,957$.

Для обчислення $F(t)$, $f(t)$, $P(t)$ у практичних інженерних розрахунках використовують таблиці нормованого нормального розподілу¹, для якого $M[t] = 0$ і $\sigma = 1$.

Розподіл, у якому $M[t] = 0$, називають *центрованим*. Графік такої функції $f(t)$ розміщено симетрично до початку координат.

При введенні змінної Z

$$Z = \frac{t - M[t]}{\sigma} \quad (9.19)$$

¹ Пояснимо доцільність переходу до нормованих функцій нормального розподілу. Як випливає з формули (9.15), функція $F(t)$ визначається інтегруванням диференціальної функції $f(t)$. При цьому підінтегральну функцію не можна виразити через елементарні функції, тобто обчислити прямо, а тільки за допомогою розкладання в ряд.

Зазначена незручність легко долається, якщо обчислювати інтеграл через нормовану нормальну функцію, значення якої табульовані. Це дає змогу обчислення інтегралів замінити використанням таблиць.

Табулювання функції – це обчислення й занесення до таблиці значень функції для дискретного набору значень аргументу на заданому відрізку. Набір може бути рівномірним із заданим кроком h або нерівномірним.

густина імовірності нормованого нормального розподілу (диференціальна функція) набуває вигляду:

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right], \quad -\infty < z < \infty, \quad (9.20)$$

а функція розподілу імовірностей (інтегральна функція)

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right]. \quad (9.21)$$

З останнього виразу випливає, що $F(-z) + F(z) = 1$. Звідси $F(-z) = 1 - F(z)$.

Для випадкової величини t , розподіленої за нормальним законом із математичним сподіванням $M[t]$ і середньоквадратичним відхиленням σ , вираз функції розподілу імовірностей (9.21) пов'язаний співвідношенням

$$F(t) = P[t \leq t_3] = P\left[z \leq \frac{t - M[t]}{\sigma}\right] = F\left(\frac{t - M[t]}{\sigma}\right), \quad (9.22)$$

яке за табличним значенням $F\left(\frac{t - M[t]}{\sigma}\right)$ дає змогу визначити імовірність відмови $F(t)$.

Функції $f(t)$, $F(t)$, $P(t)$ пов'язані з функціями $\varphi(z)$, $F(z)$ такими співвідношеннями:

$$f(t) = (1/\sigma) \varphi\left(\frac{t - M[t]}{\sigma}\right); \quad (9.23)$$

$$F(t) = F(z) = F\left(\frac{t - M[t]}{\sigma}\right); \quad (9.24)$$

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - F(z) = 1 - F\left(\frac{t - M[t]}{\sigma}\right). \quad (9.25)$$

Імовірність відмови в інтервалі напрацювання $[t_1, t_2]$, виражена через функцію $F(z)$,

$$\begin{aligned} F(t_1, t_2) &= \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = F(t_2) - F(t_1) = F(z_2) - F(z_1) = \\ &= F\left(\frac{t_2 - M[t]}{\sigma}\right) - F\left(\frac{t_1 - M[t]}{\sigma}\right). \end{aligned} \quad (9.26)$$

Часто в розрахунках замість інтегральної функції розподілу $F(z)$ користуються функцією Лапласа, яку також задають у вигляді таблиць, що їх можна знайти практично у всіх довідниках із теорії імовірності, статистики та надійності

$$\Phi(z) = \int_0^z \varphi(z) dz = \frac{1}{2z} \int_0^z \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (9.27)$$

У цьому випадку очевидно, що

$$F(z) = \int_{-\infty}^0 \varphi(z) dz + \int_0^z \varphi(z) dz = 0,5 + \Phi(z). \quad (9.28)$$

Тоді імовірність відмови та імовірність безвідмовної роботи (функція надійності) визначаються за формулами:

$$Q(t) = F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - M[t]}{\sigma}\right); \quad P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - M[t]}{\sigma}\right). \quad (9.29)$$

Правило знаків для функції Лапласа $\Phi(-z) = -\Phi(z)$.

При використанні довідкових таблиць застосовують підстановку $z = \frac{t - M[t]}{\sigma}$, яку позначають u_p і називають квантилем нормованого нормального розподілу.

Графіки зміни функції інтегрального нормованого нормального розподілу, густини нормованого нормального розподілу та функції Лапласа наведено на рис. 9.10.

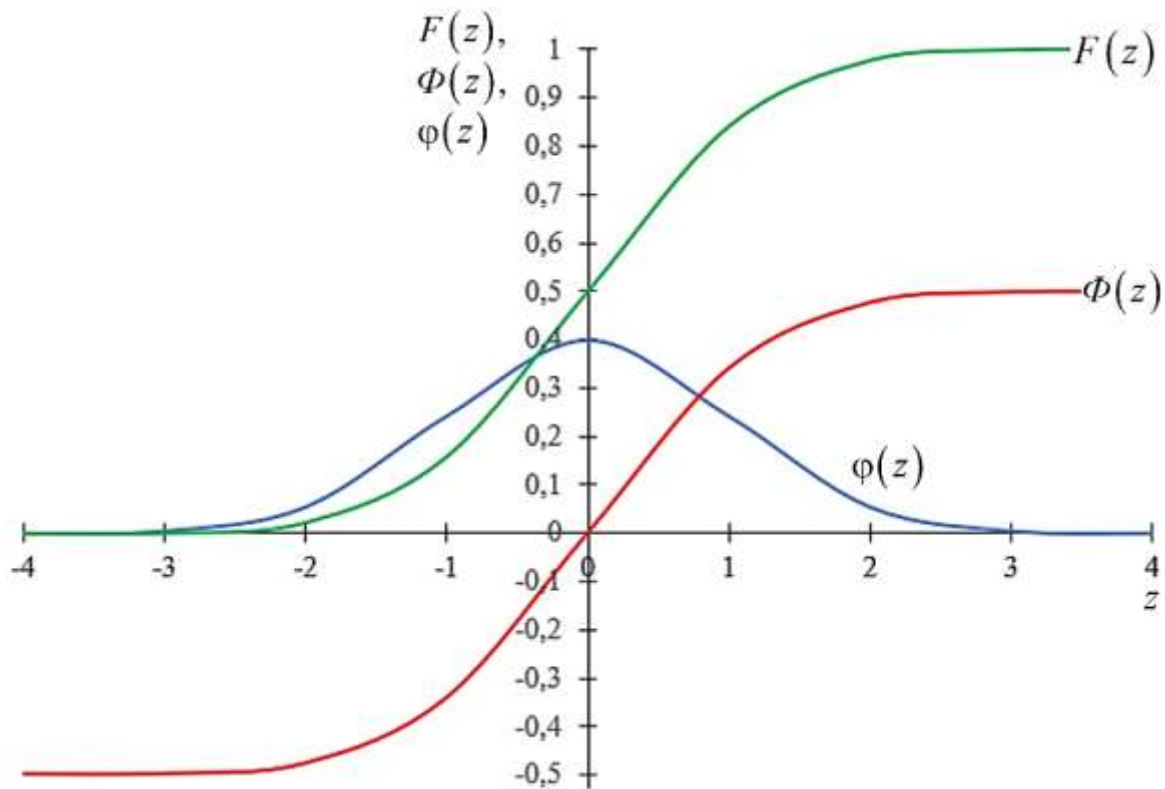


Рис. 9.10. Графіки зміни функції $F(z)$, $\Phi(z)$, $\phi(z)$

Нормальний розподіл у теорії імовірностей створений для опису випадкових похибок вимірювань. Проте його застосування в якості моделі для аналізу відмов не рекомендується з кількох причин:

- у контексті надійності, наявність від’ємних значень наробітку, що допускається нормальним розподілом, є фізично некоректною та неприйнятною;

- нормальний розподіл не підходить для випадків із коефіцієнтом варіації понад 0,25, тоді як більшість розподілів відмов мають саме такі значення або ще вищі;

- на практиці розподіли відмов зазвичай мають асиметричну форму, тоді як нормальний розподіл завжди симетричний.

Водночас нормальний розподіл може бути корисним для апроксимації характеристик, таких як границя міцності, текучості або витривалості, коли коефіцієнт варіації невеликий (у межах 0,05–0,25).

Приклад 9.2. Потрібно оцінити імовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов корінних підшипників колінчастого вала дизеля після наробітку 130 тис. км. Ресурс за зносом підшипників описується нормальним законом із параметрами: математичне сподівання дорівнює $420 \cdot 10^3$ км, а середньоквадратичне відхилення наробітку від математичного сподівання $150 \cdot 10^3$ км.

Розв'язання. Імовірність безвідмовної роботи пов'язана з нормованою випадковою величиною z , розподіленою за нормальним законом, співвідношенням:

$$P(l) = P[L > l] = 1 - P\left[z > \frac{l - M[l]}{\sigma}\right],$$

коли функція розподілу випадкової величини z задана формулою (9.21). У цьому випадку

$$\begin{aligned} P(130 \cdot 10^3) &= 1 - P\left[z > \frac{130 \cdot 10^3 - 420 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3}\right] = \\ &= 1 - P[-1,93] = 1 - (1 - F(1,93)) = 1 - (1 - 0,973) = 0,973. \end{aligned}$$

Значення $F(1,93)$ можна знайти за допомогою таблиць або розрахувати в MS Excel за допомогою вбудованої функції «NORM.S.DIST(1,93; TRUE)». Аналогічний результат можна отримати, використовуючи в якості функції розподілу випадкової величини Z вираз (9.19). У відповідності з (9.21)

$$P(l) = 0,5 - \Phi\left(\frac{l - M[l]}{\sigma}\right),$$

а величина $\Phi(z) = \Phi\left(\frac{l - M[l]}{\sigma}\right)$ також знаходиться за допомогою таблиць або розраховується в MS Excel.

$$P(130 \cdot 10^3) = 0,5 - \Phi \left[\frac{130 \cdot 10^3 - 420 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right] = 0,5 - \Phi[-1,93] = \\ = 0,5 - (-0,473) = 0,5 + 0,473 = 0,973.$$

Значення інтенсивності відмов може бути знайдено за допомогою співвідношення:

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{P(l)} = \frac{\varphi \left(z = \frac{l - M[l]}{\sigma} \right)}{\sigma \cdot P(l)},$$

де $\varphi(z)$ визначається за формулою (9.16) або знаходиться за допомогою таблиць або розраховується в MS Excel за допомогою вбудованої функції NORM.S.DIST(-1,93; FALSE). У нашому випадку

$$\lambda(l) = \frac{\varphi \left(\frac{130 \cdot 10^3 - 420 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)}{150 \cdot 10^3 \cdot 0,973} = \frac{\varphi(-1,93)}{145950} = \frac{0,062}{145950} = 4,25 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}.$$

Приклад 9.3. Напрацювання одного з вузлів вагона підпорядковується закону нормального розподілу з параметрами $M[l] = 6000$ км і $\sigma = 1500$ км. Визначити кількісні характеристики $f(l)$, $F(l)$, $P(l)$ і $\lambda(l)$ для наробітку $l = 2500$ км, а також 90 %-й наробіток до відмови $l_{\gamma=90\%}$.

Розв'язання. Визначимо частоту відмов (густину імовірності наробітку до відмови) для $l = 2500$ км, використовуючи формулу (9.14):

$$f(2500) = \frac{1}{1500\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(2500 - 6000)^2}{2 \cdot 1500^2} \right] = \\ = \frac{1}{1500\sqrt{2\pi}} \exp[-2,72] = \frac{1}{1500 \cdot 2,506} \cdot 0,0659 = 0,175 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}.$$

Практично такий самий результат отримаємо за формулою (9.23), використовуючи табличне значення диференціальної функції нормованої нормально розподіленої випадкової величини $\varphi(z)$.

Для приведення нормального розподілу з довільними параметрами $(M[l], \sigma)$ до стандартного нормального закону з параметрами $M[l] = 0$ і $\sigma = 1$, тобто з параметрами $(0, 1)$, використовуємо лінійне перетворення (9.19).

У нашому випадку $z = \frac{2500 - 6000}{1500} = -2,33$. З урахуванням правила знаків і у відповідності до таблиці функції $\varphi(z)$:

$$\varphi(-2,33) = \varphi(2,33) = 0,26426.$$

Тоді

$$f(2500) = (1/1500) \cdot 0,26426 = 0,176 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}.$$

Обчислимо імовірність відмови за наробіток $t = 2500$ км, використовуючи табличні значення інтегральної нормованої функції $F(z)$. Нагадаємо, що для невід'ємних значень z — $F(l) = F(z)$, для від'ємних z — $F(l) = F(-z) = 1 - F(z)$.

Оскільки аргумент z функції $F(z)$ має від'ємне значення ($z = -2,33$), то $F(l) = F(-2,33) = 1 - F(2,33)$. Табличне значення інтегральної нормованої функції $F(2,33) = 0,99$.

Остаточнo отримаємо

$$F(2500) = 1 - F(2,33) = 1 - 0,99 = 0,01.$$

Аналогічний результат ми отримаємо, використовуючи функцію Лапласа. Відповідно до формули (9.29) і з урахуванням правила знаків для функції Лапласа

$$F(2500) = 0,5 + \Phi(-2,33) = 0,5 - \Phi(2,33).$$

Табличне значення функції $\Phi(2,33) = 0,49$. Тоді

$$F(2500) = 0,5 - \Phi(2,33) = 0,5 - 0,49 = 0,01.$$

Визначимо імовірність безвідмовної роботи за наробіток $l = 2500$ км

$$P(2500) = 1 - F(2500) = 1 - 0,01 = 0,99.$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(2500) = \frac{f(l)}{P(l)} = \frac{0,17 \cdot 10^{-4}}{0,99} = 0,172 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}.$$

Обчислюємо 90%-вий наробіток до відмови $l_{\gamma=90\%}$, використовуючи формулу (5.12) і квантиль нормованого нормального розподілу z_{γ} , що відповідає імовірності $\gamma = 0,9$.

Відповідно до таблиць для $\gamma = 0,9$ табличне значення квантиля $z_{\gamma=0,9} = 1,282$. Тоді

$$l_{\gamma=0,9} = 6000 - 1,282 \cdot 1500 = 4077 \text{ км}.$$

Звідси випливає, що 90 % вузлів вагона, що розглядаються, матимуть напрацювання, що перевищує значення гамма-відсоткового наробітку $l_{\gamma=0,9}$, що дорівнює 4077 км.

9.5.3. Усічений нормальний розподіл

Усіченим нормальним розподілом випадкової величини називається розподіл, що отримується з нормального при обмеженні інтервалу зміни випадкової величини наробітку на відмову невід'ємними значеннями. Цей розподіл вносить уточнення в розрахунки надійності порівняно з нормальним розподілом при великих значень коефіцієнта варіації v .

Диференціальна функція (густина) розподілу наробітку до відмови

$$f(t) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (9.30)$$

де c – коефіцієнт пропорційності (нормувальний множник усіченого нормального розподілу);

t_0 – мода, тобто значення випадкової величини, що відповідає максимуму $f(t)$.

$$c = \frac{1}{F(t_0/S_\sigma)}, \quad (9.31)$$

де $F(t_0/S_\sigma)$ – інтегральна нормована функція.

Функція густини розподілу усіченого нормального розподілу записується так само, як густина нормального розподілу, але з коефіцієнтом пропорційності c .

Функція надійності (імовірність безвідмовної роботи)

$$P(t) = cF\left(\frac{t_0 - t}{\sigma}\right) = \frac{F\left(\frac{t_0 - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)}. \quad (9.32)$$

Середній наробіток до першої відмови (математичне сподівання)

$$\begin{aligned} T_c = M[t] &= t_0 + \frac{c\sigma}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-t_0^2}{2\sigma^2}\right) = \\ &= t_0 + \frac{\sigma}{F(t_0/\sigma) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-t_0^2}{2\sigma^2}\right). \end{aligned} \quad (9.33)$$

Прикладом усічених розподілів може бути розподіл параметра якості виробів після відбраковування частини виробів за цим параметром.

Приклад 9.4. Наробіток елемента локомотива до відмови підпорядковано усіченому нормальному закону з параметрами $t_0 = 8000$ км, $\sigma = 2000$ км. Потрібно обчислити кількісні характеристики надійності $f(l)$, $F(l)$, $P(l)$, $\lambda(l)$ і $L_{\text{сер}}$ для наробітку $l = 4000$ км.

Розв'язання. Обчислимо імовірність безвідмовної роботи та імовірність відмови, використовуючи табличні значення інтегральної нормованої функції $F(z)$

$$P(4000) = \frac{F\left(\frac{8000-4000}{2000}\right)}{F\left(\frac{8000}{2000}\right)} = \frac{F(2)}{F(4)} = \frac{0,9773}{1} = 0,9773.$$

$$P(4000) = 1 - 0,9773 = 0,0227.$$

Густина розподілу (частота відмов)

$$\begin{aligned} f(l) &= \frac{c}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(l-l_o)^2}{2\sigma^2}\right) = \\ &= \frac{1}{F(t_o/\sigma) \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(l-l_o)^2}{2\sigma^2}\right). \end{aligned}$$

Обчислення зручно проводити, використовуючи таблицю диференціальної нормованої функції $\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2}$. У нашому випадку $z = (t_o - t)/\sigma$.

Маючи на увазі, що $F(t_o/\sigma) = F(8000/2000) = F(4) \approx 1$ тобто $c = 1$, отримаємо

$$\begin{aligned} f(4000) &= \frac{\varphi(z)}{S_\sigma} = \frac{\varphi\left(\frac{4000-8000}{2000}\right)}{2000} = \\ &= \frac{\varphi(-2)}{2000} = \frac{\varphi(2)}{2000} = \frac{0,05399}{2000} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}. \end{aligned}$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{P(l)} = \frac{f(4000)}{P(4000)} = \frac{2,7 \cdot 10^{-5}}{0,9773} = 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}.$$

Середній наробіток до відмови за (9.33)

$$L_c = 8000 + \frac{2000}{F(8000/2000) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-8000^2}{2 \cdot 2000^2}\right) = 8000,27 \text{ км.}$$

9.5.4. Логарифмічно-нормальний розподіл

Логарифмічно нормальний розподіл описує випадкові величини, логарифм яких розподілений за нормальним законом. Цей розподіл може бути прийнятий як статистична модель в тих випадках, коли випадкова величина отримується в результаті множення великої кількості невеликих відхилень, подібно до того, як нормальний розподіл має місце в разі складання таких відхилень. Цей розподіл найчастіше може бути використаний під час аналізу поступових відмов унаслідок порушення міцності та зниження втомної довговічності під впливом змінних навантажень і вібрації, тобто у період настання втоми матеріалів і зносових відмов. Наприклад, відмови елементів механічної частини рухомого складу, колінчастих валів, елементів кривошипно-шатунної групи, систем автоматики та електронних систем керування.

Логарифмічно нормальний розподіл існує тільки для невід'ємних випадкових величин, оскільки від'ємні числа логарифму не мають.

Диференціальна функція (густина розподілу) логарифмічно-нормального закону записується у вигляді:

$$f(\ln t) = \frac{1}{\sigma_{\ln(t)} \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \ln(M[t])}{\sigma_{\ln(t)}}\right)^2\right]. \quad (9.34)$$

Математичне сподівання $\ln(m_t)$ і середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\ln(t)}$ натурального логарифма випадкової величини t , що позначає наробіток, визначаються на основі співвідношень:

$$\ln(M[t]) \approx \overline{\ln(M[t])} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(t_i);$$

$$\sigma_{\ln(t)} \approx \overline{\sigma_{\ln(t)}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(t_i) - \ln(M[t]))^2}.$$

Інтегральна функція розподілу логарифмічно-нормального закону записується у вигляді:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma_{\ln(t)} \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \ln(M[t])}{\sigma_{\ln(t)}} \right)^2 \right] dt, \quad (9.35)$$

і її можна пов'язати з нормованою випадковою величиною z , визначеною за нормальним законом, аналогічно до виразу (9.22)

$$F(t) = Q(t) = P[t \leq t_3] = P \left[z \leq \frac{\ln(t) - \ln(M[t])}{\sigma_{\ln(t)}} \right]. \quad (9.36)$$

Імовірність безвідмовної роботи записується таким чином

$$P(t) = P[t > t_3] = P \left[z > \frac{\ln(t) - \ln(M[t])}{\sigma_{\ln(t)}} \right], \quad (9.37)$$

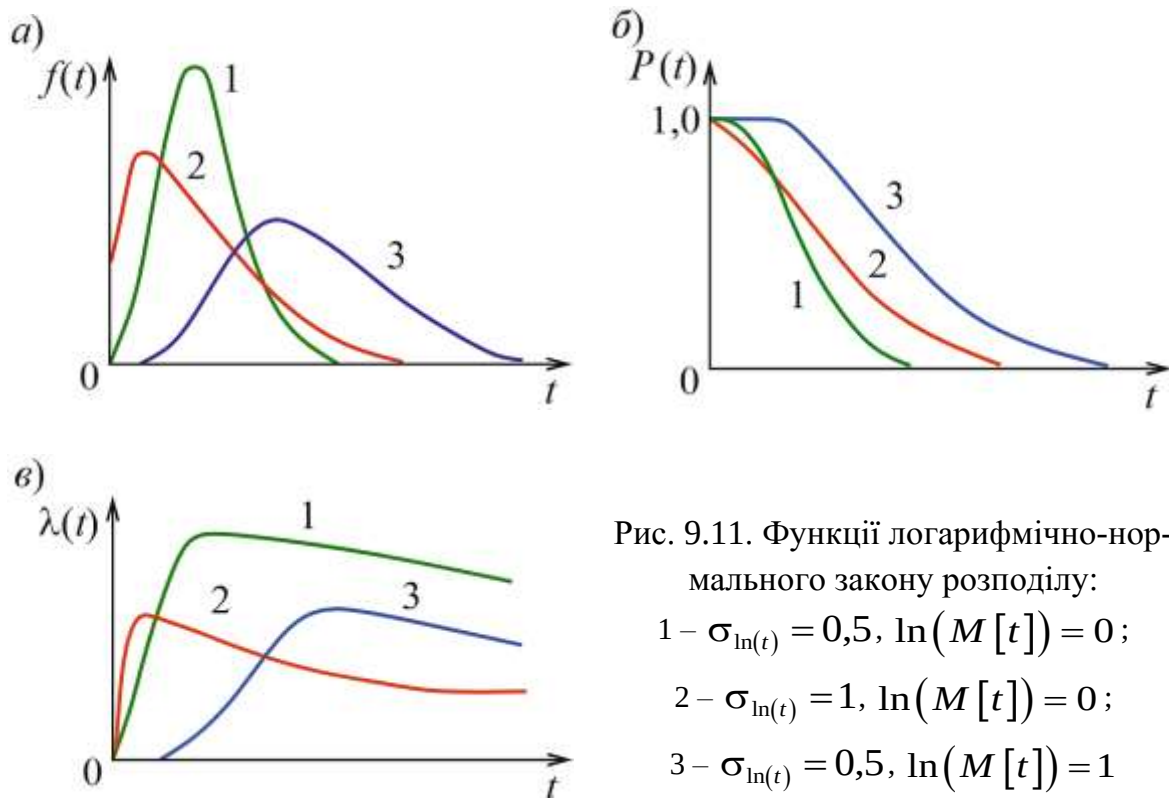
а інтенсивність відмов має вигляд:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\varphi \left(\frac{\ln(t) - \ln(M[t])}{\sigma_{\ln(t)}} \right)}{t \cdot \sigma_{\ln(t)} \cdot P(t)}, \quad (9.38)$$

де φ – густина нормованого нормального розподілу, що визначається за довідковими таблицями або розраховується.

На рис. 9.11 наведено графіки функцій густини розподілу імовірності (*a*), імовірності безвідмовної роботи (*б*) та інтенсивності відмов логарифмічно-нормального закону розподілу (*в*) з різними значеннями параметрів.

Приклад 9.5. Наробіток елементів конструкції електронних систем керування локомотива до відмови підпорядковується логарифмічно-нормальному закону з параметрами $\ln(M[t]) = 12,2$ та $\sigma_{\ln(t)} = 1,8$. Необхідно знайти імовірність безвідмовної роботи елементів та інтенсивність відмов за наробіток 100 тис. км.



Розв'язання. Імовірність безвідмовної роботи визначаємо за формулою (9.25)

$$P(100 \cdot 10^3) = 1 - P \left[z > \frac{\ln(100 \cdot 10^3) - 12,2}{1,8} \right] =$$

$$= 1 - P[z > -0,382] = 1 - (1 - F(0,382)) = 1 - (1 - 0,649) = 0,649.$$

Величину інтенсивності відмов визначаємо за формулою (9.38)

$$\lambda(100 \cdot 10^3) = \frac{\varphi \left(\frac{\ln(100 \cdot 10^3) - 12,2}{1,8} \right)}{100 \cdot 10^3 \cdot 1,8 \cdot 0,649} =$$

$$= \frac{\varphi(-0,382)}{116820} = \frac{0,371}{116820} = 3,18 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1}.$$

9.5.5. Розподіл Вейбулла

Розподіл Вейбулла використовують у теорії надійності в якості статичної моделі для опису наробітку виробів до відмови або до граничного стану.

У теорії надійності він є *найбільш загальним (універсальним)* розподілом наробітку елементів до відмови (часу безвідмовної роботи), наробітку (часу роботи) до граничного стану машин, для опису розподілу термінів служби інших різних пристроїв, і тому його найбільш часто використовують у розрахунках показників надійності.

Розподіл Вейбулла має два різновиди – дво- і трипараметричний. На практиці частіше зустрічається двопараметричний розподіл.

Диференціальна функція (густина) розподілу наробітку до відмови (частота відмов)

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right], \quad (9.39)$$

де a – параметр масштабу розподілу¹;

b – параметр форми розподілу²;

Формула справедлива для $a > 0$ та $b > 0$.

Іноді параметр масштабу задається у вигляді $a = a^{-b}$. У цьому разі вираз (9.39) перетворюється на вигляд:

$$f(t) = \frac{b \cdot t^{b-1}}{a^b} \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (9.40)$$

¹ Параметр масштабу (відповідно до ДСТУ 8646:2016) – це параметр функції розподілу напрацювання до відмови (на відмову), що характеризує розташування розподілу на тимчасовій осі. Параметр масштабу – це характеристика розподілу, яка визначає, наскільки розтягнута або стиснута функція розподілу вздовж осі часу. У розподілах надійності він задає типовий масштаб часу, з яким пов'язано настання відмов. Збільшення параметра масштабу призводить до «розширення» розподілу (відмови в середньому настають пізніше), а зменшення – до його «стиснення» (відмови в середньому настають швидше).

² Параметр форми (відповідно до ДСТУ 8646:2016) – це параметр функції розподілу напрацювання до відмови (на відмову), який характеризує вид і форму розподілу. Параметр форми визначає вид кривої розподілу: чи зростає/спадає імовірність відмови, чи вона стала.

За наробітком $M[t]$, протягом якого відмови не відбуваються, тобто за довільного початку відліку вираз (9.39) записується як

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t - M[t]}{a} \right) \exp \left[- \left(\frac{t - M[t]}{a} \right)^b \right], \quad t \geq M[t]. \quad (9.41)$$

Функція розподілу імовірностей (імовірність відмови)

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (9.42)$$

Імовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (9.43)$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1}. \quad (9.44)$$

Середній наробіток до відмови (математичне сподівання наробітку об'єкта до першої відмови)

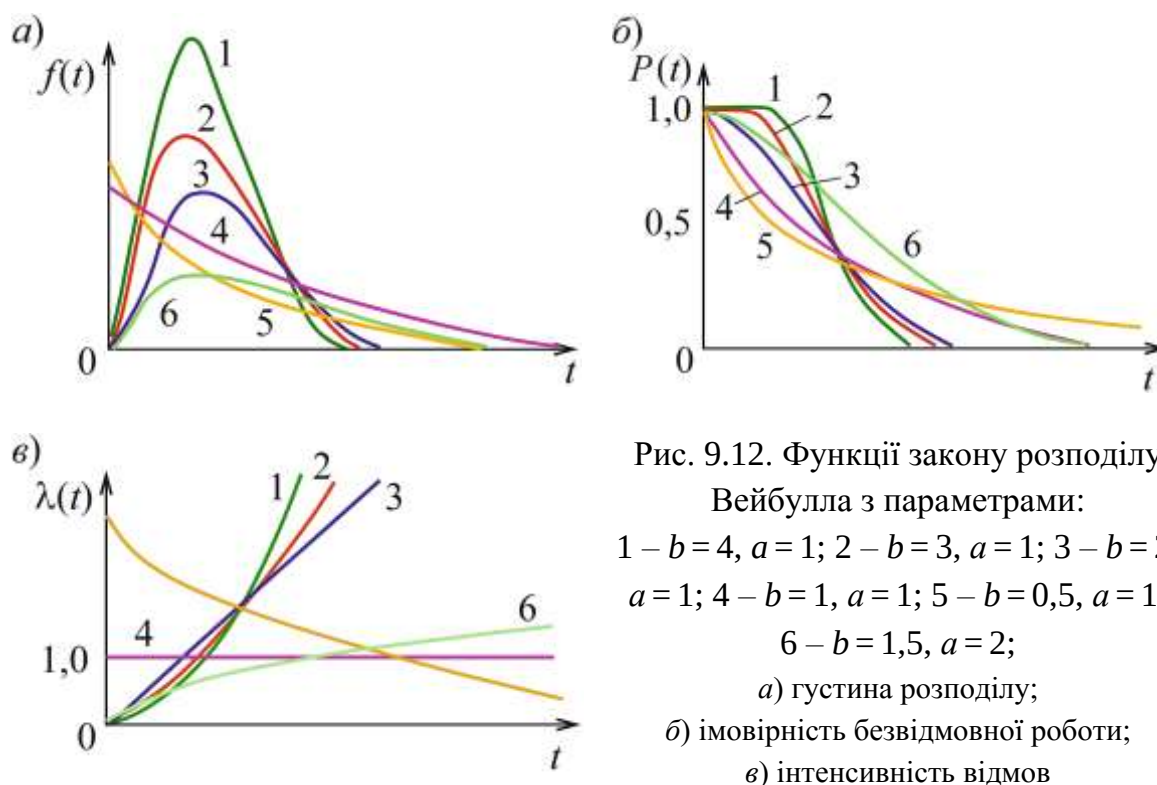
$$T_c = a \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right), \quad (9.45)$$

де Γ – табульована гамма-функція.

На рис. 9.12 наведено різні форми функцій густини розподілу закону Вейбулла (*a*), а також відповідні до них графіки функцій імовірності безвідмовної роботи (*б*) та інтенсивності відмов (*в*).

За умови $b < 1$ функція густини розподілу має вигляд функції, що спадає, а інтенсивність відмов також спадає з наробітком; за умови $b = 1$ розподіл збігається з експоненційним; за $b > 1$ густина розподілу одновершинна з позитивною асиметрією, а інтенсивність відмов

зростає з наробітком; за $b=2$ інтенсивність відмов є лінійною функцією (цей окремий випадок розподілу Вейбулла збігається з розподілом Релея); за $b=3,3$ розподіл є приблизно симетричним, тобто близький до нормального закону розподілу; за $b>3,5$ розподіл зміщується вздовж осі часу і набуває від'ємної асиметрії.



Відмітна особливість закону розподілу Вейбулла – правобічна асиметрія диференціальної функції. Унаслідок асиметрії на відміну від нормального закону середнє, модальне і медіанне значення показника надійності при законі розподілу Вейбулла не дорівнюють між собою.

Функція розподілу Гнеденко використовується як математична модель відмов систем, що складаються з низки елементів, з'єднаних послідовно з погляду забезпечення безвідмовності системи. Наприклад, відмови систем, що обслуговують дизель-генераторну установку: змащення, охолодження, живлення паливом, повітрям тощо. Розподіл величини коефіцієнта технічного використання, величини напрацювань до непланового ремонту механічного та електричного обладнання, час простою в непланових і поточних ремонтах також добре описується цим законом розподілу.

Для дослідження надійності рухомого складу закон Вейбула є одним із ключових, оскільки дозволяє моделювати різні режими виник-

нення відмов – від початкових, пов’язаних із нестабільністю параметрів після виготовлення чи ремонту, до відмов, зумовлених зношуванням під час довготривалої експлуатації. Показник форми b точно характеризує поведінку елементів: при $b < 1$ частіші ранні відмови, при $b = 1$ інтенсивність відмов залишається сталою, а при $b > 1$ імовірність відмови зростає внаслідок накопичення деградаційних процесів. Завдяки цьому закон Вейбула добре відображає надійність таких складальних одиниць, як буксові підшипники, пружне підвішування, зубчасті передачі, компресори та електричні машини.

Другою важливою перевагою цього закону є можливість коректної обробки реальних експлуатаційних даних, у тому числі неповних та цензурованих вибірок, що характерно для умов роботи залізничного транспорту. Використання параметрів розподілу Вейбула забезпечує точне оцінювання гамма-процентних ресурсів, імовірності безвідмовної роботи й дозволяє формувати обґрунтовані плани випробувань. Це створює практичну основу для оптимізації міжремонтних пробігів, визначення періодичності технічного обслуговування та прогнозування залишкового ресурсу рухомого складу.

Приклад 9.6. Час простою рухомого складу у непланових ремонтах через відмови допоміжного устаткування підпорядковується закону розподілу Вейбулла-Гнеденко з параметрами $b = 2,2$ і $a = 45$. Потрібно визначити імовірність виходу рухомого складу з непланових ремонтів після 24 год простою і час простою, протягом якого його працездатність буде відновлено з імовірністю 0,95.

Розв’язання. За виразом (9.42) знаходимо імовірність відновлення працездатності рухомого складу після простою в депо протягом доби

$$F(24) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{24}{45} \right)^{2,2} \right] = 1 - 0,778 = 0,221.$$

Для визначення часу відновлення працездатності рухомого складу із заданою величиною довірчої імовірності також використовується вираз (9.42)

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{45} \right)^{2,2} \right] = 0,95; \quad \exp \left[- \left(\frac{x}{45} \right)^{2,2} \right] = 1 - 0,95 = 0,05;$$

$$2,99 = \left(\frac{x}{45} \right)^2 ; \quad x = 77,8 \text{ год} \approx 3,24 \text{ доби.}$$

Таким чином, за наявної системи організації ремонту в депо працездатність рухомого складу може бути відновлена не раніше, ніж через три доби.

Приклад 9.7. Напрацювання розглянутого елемента рухомого складу до відмови підпорядковано розподілу Вейбулла-Гнеденко з параметрами $a = 500$ тис. км, $b = 2$. Потрібно обчислити кількісні характеристики надійності $f(l)$, $F(l)$, $P(l)$, $\lambda(l)$ і L_c для $l = 100$ тис. км.

Розв'язання. Імовірність безвідмовної роботи за наробіток l

$$P(100) = \exp \left[- \left(\frac{100}{500} \right)^2 \right] = \exp \left[- (0,2)^2 \right] = 0,961.$$

Імовірність відмови за наробіток l

$$F(100) = 1 - P(100) = 1 - 0,961 = 0,039.$$

Густина розподілу (частота відмов)

$$\begin{aligned} f(100) &= \frac{2}{500} \left(\frac{100}{500} \right)^{2-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{100}{500} \right)^2 \right] = \\ &= 0,004 \cdot 0,2 \cdot 0,961 = 7,96 \cdot 10^{-4} \text{ тис. км}^{-1}. \end{aligned}$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(100) = \frac{f(l)}{P(l)} = \frac{7,96 \cdot 10^{-4}}{0,961} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ тис. км}^{-1}.$$

Розрахуємо середній наробіток до першої відмови, використовуючи табличне значення гамма-функції $\Gamma(x)$.

У нашому випадку $x = 1 + 1/b = 1 + 1/2 = 1,5$. Відповідно до довідкових таблиць Гамма-функції $\Gamma(1,5) = 0,8862$. Тоді

$$L_c = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) = 500 \cdot 0,8862 = 443,1 \text{ тис. км.}$$

9.5.6. Гамма-розподіл

Цей розподіл є основним у математичній статистиці для випадкових величин, обмежених з одного боку ($0 \leq t < \infty$).

Гамма-розподіл є двопараметричним та за різних параметрів гамма-розподіл набуває найрізноманітніших форм, що й пояснює його широке застосування.

Диференціальна функція (густина імовірності) гамма-розподілу (за $t \geq 0, b > 0, a > 0$)

$$f(t) = \frac{t^{b-1}}{a^b \Gamma(b)} \exp\left(-\frac{t}{a}\right), \quad (9.46)$$

де b — параметр форми;

a — параметр масштабу розподілу;

$\Gamma(b) = \int_0^{\infty} t^{b-1} \cdot e^{-t} dt$ — табульована повна гамма-функція.

Функцію розподілу виражають через відношення неповної гамма-функції $\Gamma(b, x) = \int_0^x y^{b-1} \cdot e^{-y} dy$ до повної

$$F(t) = Q(t) = \Gamma(b, t/a) / \Gamma(b).$$

Якщо b є цілим додатнім числом, то імовірність безвідмовної роботи розраховується як

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{a}\right) \sum_{i=0}^{b-1} \frac{(t/a)^i}{i!}, \quad (9.47)$$

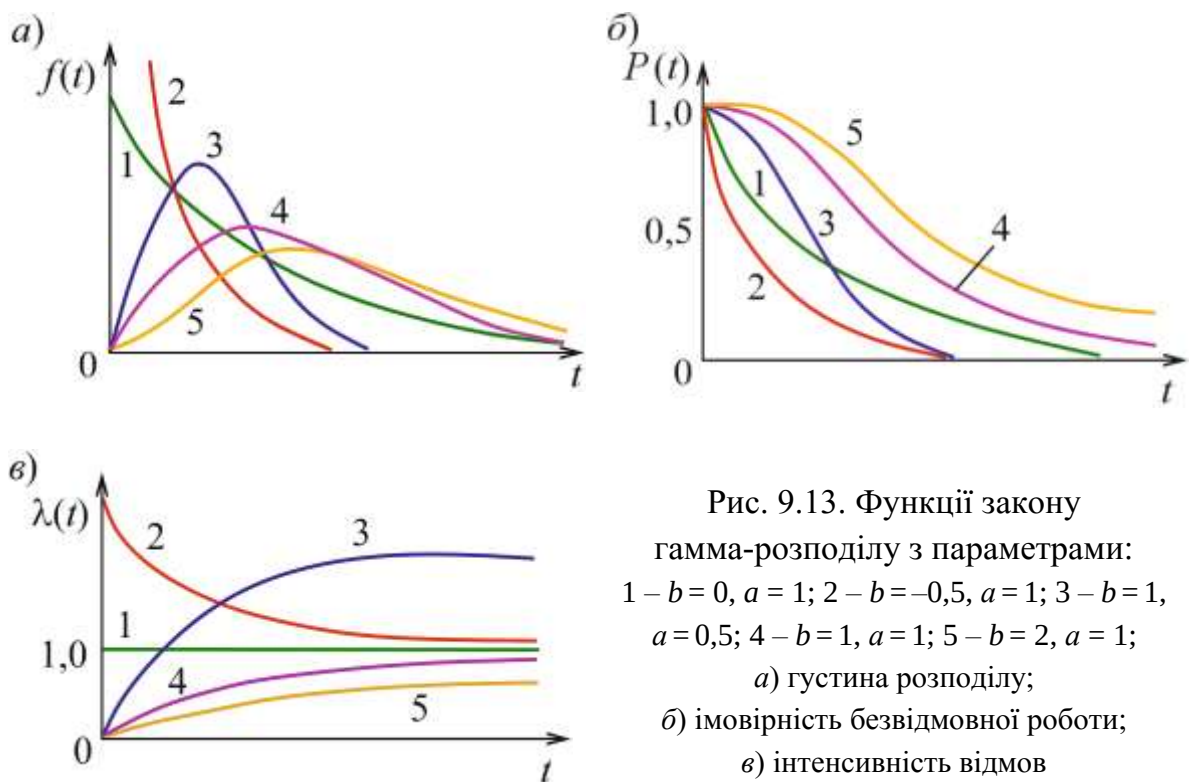
а функція інтенсивності відмов у вигляді

$$\lambda(t) = \frac{t^{b-1}}{a^b \cdot (b-1)!} \sum_{i=0}^{b-1} \frac{(t/a)^i}{i!}. \quad (9.48)$$

Середній наробіток до відмови (математичне сподівання наробітку об'єкта до першої відмови)

$$T_c = a \cdot b. \quad (9.49)$$

Типові приклади функцій густини гамма-розподілу (дуже схожі на функції густини розподілу Вейбулла) і відповідні їм функції $P(t)$ і $\lambda(t)$ наведено на рис. 9.13.



При зміні параметра a форма розподілу не змінюється, а змінюється тільки масштаб; при зміні b змінюється форма розподілу. Величина параметра b чинить значний вплив на вигляд основних кількісних характеристик надійності.

Функція інтенсивності відмов зменшується за $b < 1$, що відповідає ситуації, коли відбувається швидке «вигорання ненадійних елементів».

За $b > 1$ інтенсивність відмов зростає, що характерно для поступового зношування і старіння елементів. Якщо $b = 1$, то гамма-розподіл

перетворюється на експоненційний і інтенсивність відмов $\lambda(t) = a = \text{const}$. За $b > 10$ гамма-розподіл практично збігається з нормальним розподілом. Якщо b – довільне ціле додатне число, то такий гамма-розподіл називають розподілом Ерланга. Якщо $a = 1/2$, а значення b кратне $1/2$, то гамма-розподіл збігається з розподілом хі-квадрат.

Таким чином, як і розподіл Вейбулла, гамма-розподіл містить клас експоненційних розподілів. Тому його можна застосовувати для опису розподілу напрацювання до n -ї відмови відновлюваного електрообладнання рухомого складу, час безвідмовної роботи якого підпорядковується експоненційному розподілу.

Гамма-розподіл застосовують для аналізу відмов, що виникають унаслідок зносу за досить стабільної технології виготовлення елементів і короткого періоду їхнього припрацювання. Наприклад, відмови елементів електрообладнання, відмови підшипників двигунів і механізмів; відмови реверсивних систем у разі ввімкнення резервних елементів за схемою заміщення (систем, що мають резервні фільтри, теплообмінні апарати тощо). Як показують дослідження, гамма-розподіл можна використовувати для розрахунку імовірності відновлення справного стану рухомого складу під час проведення планових ремонтів.

Приклад 9.8. Час роботи електрообладнання локомотива підпорядкований гамма-розподілу з параметрами $a = 80 \cdot 10^3$ км; $b = 2,0$.

Необхідно визначити імовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов устаткування для наробітку між ПР-1 (25 тис. км), а також величину середнього наробітку до першої відмови.

Розв'язання. Використовуючи формули (9.47–9.49), знаходимо

$$P(25 \cdot 10^3) = e^{-\frac{25 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3}} \cdot \left(1 + \frac{25 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3}\right) \approx 0,96.$$

$$\lambda(25 \cdot 10^3) = \frac{(25 \cdot 10^3)^{2-1}}{(80 \cdot 10^3)^2 \cdot (2-1)!} \cdot \left(1 + \frac{25 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3}\right) \approx 5,13 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1}.$$

$$L_c = 80 \cdot 10^3 \cdot 2 = 160 \cdot 10^3 \text{ км}.$$

Таким чином, параметри безвідмовності аналізованого обладнання в період напрацювання між ПР-1 відповідають необхідним вимогам.

Приклад 9.9. Наробіток одного з вузлів вагона підпорядковано гамма-розподілу з параметрами $a = 600$ тис. км, $b = 2$. Потрібно обчислити кількісні характеристики надійності $f(l)$, $Q(l)$, $P(l)$, $\lambda(l)$ і L_c для $l = 200$ тис. км.

Розв'язання. Густина розподілу (частота відмов)

$$f(200) = \frac{200^{2-1}}{600^2 \Gamma(2)} \exp\left(-\frac{200}{600}\right) = \frac{200 \cdot 0,717}{600^2 \cdot 1} = 3,98 \cdot 10^{-4} \text{ тис. км}^{-1}.$$

Імовірність безвідмовної роботи за наробіток l

$$P(l) = \exp\left(-\frac{l}{a}\right) \sum_{i=0}^{b-1} \frac{(l/a)^i}{i!}.$$

Оскільки $i = \overline{0, (b-1)} = \overline{0, 1}$, остання формула матиме вигляд

$$P(l) = \exp\left(-\frac{l}{a}\right) \left[\frac{(l/a)^0}{0!} + \frac{(l/a)^1}{1!} \right] = \exp\left(-\frac{l}{a}\right) \left[1 + \frac{l}{a} \right].$$

Тоді

$$P(200) = \exp\left(-\frac{200}{600}\right) \left[1 + \frac{200}{600} \right] = 0,717 \cdot 1,333 = 0,956.$$

Імовірність відмови

$$Q(200) = 1 - P(200) = 1 - 0,956 = 0,044.$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(200) = \frac{f(200)}{P(200)} = \frac{3,98 \cdot 10^{-4}}{0,956} = 4,16 \cdot 10^{-4} \text{ тис. км}^{-1}.$$

Середній наробіток до першої відмови

$$L_c = a \cdot b = 2 \cdot 600 = 1200 \text{ тис. км.}$$

9.5.7. Розподіл Релея

Розподіл Релея використовується в основному для аналізу роботи елементів, що мають яскраво виражений ефект старіння (елементи електрообладнання, різного роду ущільнення, шайби, прокладки, виготовлені з гумових або синтетичних матеріалів). Функція густини розподілу імовірності відмов у цьому випадку визначається виразом

$$f(t) = \frac{2t}{S^2} \exp \left[-\left(\frac{t}{S} \right)^2 \right], \quad (9.50)$$

де S – параметр розподілу.

Кількісні характеристики безвідмовності у випадку закону розподілу Релея мають вигляд:

– інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{2t}{S^2}; \quad (9.51)$$

– імовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{S} \right)^2 \right]; \quad (9.52)$$

– середній наробіток до відмови (математичне сподівання наробітку об'єкта до першої відмови)

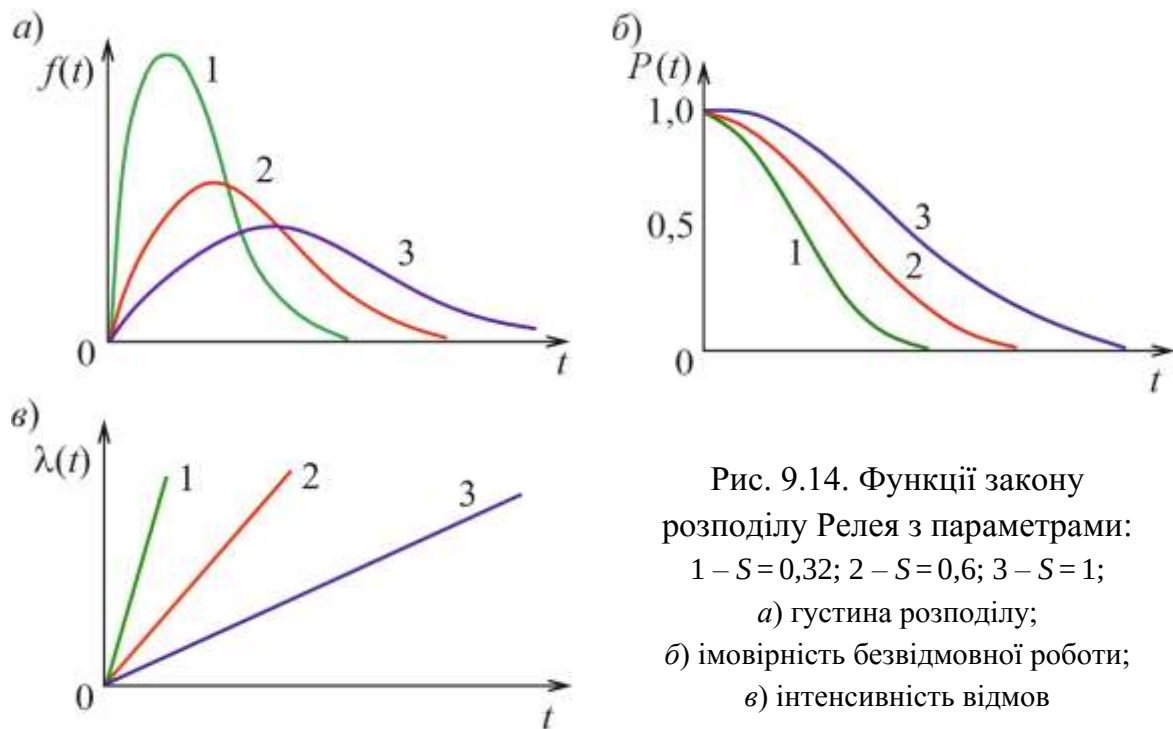
$$T_c = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp \left[-\left(\frac{t}{S} \right)^2 \right] dt = \frac{\sqrt{\pi} S}{2}. \quad (9.53)$$

Вираз для визначення $\lambda(t)$ показує, що інтенсивність відмов зростає прямо пропорційно збільшенню напрацювання.

Характер зміни в часі функцій безвідмовності для закону розподілу Релея показано на рис. 9.14.

Приклад 9.10. Для величини наробітку 130 тис. км потрібно визначити імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов і середній наробіток до першої відмови котушки електромагнітного контактора.

Відомо, що напрацювання контакторів до відмови за параметрами старіння ізоляції катушок можна описати функцією розподілу Релея з параметром $S = 250 \cdot 10^3$ км.



Розв'язання. За виразами (9.51–9.53) знаходимо:

$$\lambda(130) = \frac{2 \cdot 130 \cdot 10^3}{(250 \cdot 10^3)^2} = 4,16 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1};$$

$$P(130) = \exp \left[- \left(\frac{130 \cdot 10^3}{250 \cdot 10^3} \right)^2 \right] = 0,763;$$

$$L_c = \frac{\sqrt{\pi} \cdot 250 \cdot 10^3}{2} = 221,5 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

9.6. Поняття про параметричну надійність

У теорії та практиці надійності важливе місце посідають питання поступових відмов, які іноді називають *параметричними*, а відповідна частина надійності – *параметричною надійністю*.

Параметричні відмови та відмови функціонування мають безпосередній взаємозв'язок, і тому для розрахункового визначення їхніх кількісних величин, опису закономірностей появи та прогнозування моментів їхнього прояву в різні періоди експлуатації виникає потреба у складанні моделей процесів розвитку подібного роду відмов.

У якості критерія відмови може бути прийнято умову, коли аналізований параметр досягне граничного значення (стану). Але досягнення граничного стану необов'язково означає виникнення відмови в експлуатації. Причина цього криється в самому понятті граничного стану.

При цьому ознаки (критерії) граничного стану встановлюються нормативно-технічною документацією на основі аналізу як несучої здатності елемента, так і вихідних параметрів. І якщо критерії вичерпання несучої здатності суворіші, то критерії відмови за аналізом вихідних параметрів виявляються досить суб'єктивними. Справді, технічний стан такого складного механізму, як одиниця рухомого складу, оцінюють не одним, а багатьма вихідними параметрами, які можна поділити на кілька груп.

До *першої групи* належать вихідні параметри, які дають змогу комплексно оцінити ефективність роботи рухомого складу зі збільшенням напруження. Наприклад, зниження розрахункового значення сили тяги і погіршення паливної економічності локомотива, як правило, пов'язують зі зміною технічного стану дизеля внаслідок зносу деталей паливної апаратури, підшипників, деталей циліндро-поршневої групи, підвищеного нагароутворення на поршні і випускному колекторі. Однак ці ж параметри можуть зазнати змін і через погіршення стану ходових частин локомотива, стану верхньої будови колії, кліматичних факторів. Взаємозв'язки між подібними вихідними параметрами і процесами, що сприяють їхній зміні, зазвичай неоднозначні і випадкові. Тому *вихідні параметри першої групи можна використовувати лише для загальної оцінки технічного стану локомотива, а не для прогнозування надійності окремих деталей*.

До *другої групи* належать вихідні параметри, контроль яких можна здійснити тільки за наявності спеціальної апаратури. До цієї групи входять такі параметри, як рівні шуму, вібрації, частоти обертання,

зміни тиску активних середовищ, спектральний склад масла тощо. У більшості випадків залежність між вихідними параметрами другої групи і тим чи іншим процесом старіння значно спотворюється іншими супутніми процесами або процесами того ж виду, що відбуваються в інших вузлах рухомого складу. Тому повне уявлення про технічний стан конкретних вузлів і деталей за зміною значень параметрів другої групи можна отримати далеко не завжди. З огляду на це, вихідні параметри цієї групи *використовуються для загальної оцінки поточного стану* одиниці рухомого складу й основних її елементів.

До *третьої групи* належать вихідні параметри, які характеризують ступінь пошкодження конкретних вузлів. Так, наприклад, про несправність будь-якого циліндра дизеля можна судити за зміною таких параметрів, як максимальний тиск згоряння, температура відпрацьованих газів, подача паливних насосів, об'єм камери згоряння тощо. Про засмічення систем подачі повітря, води та масла або витіки в цих системах можна судити за зміною тиску або витрати робочих тіл. Зазвичай вихідні параметри третьої групи характерні для деталей і вузлів, термін служби яких лімітує періодичність технічного обслуговування і поточних ремонтів рухомого складу.

До *четвертої групи* можна віднести параметри, які характеризують ступінь пошкодження конкретних деталей. Наприклад, величина зносу дзеркала циліндра, поршневих кілець і спідниці поршня, зношування підшипників і зубчастих коліс, збільшення теплових зазорів, зношування контактних елементів силових електричних контакторів тощо. Донедавна вихідні параметри цієї групи можна було контролювати тільки під час перебування рухомого складу в ремонті під час розбирання тих чи інших вузлів. З появою засобів безрозбірної технічної діагностики контроль і аналіз багатьох із цих параметрів істотно спростився. Ці параметри найбільш об'єктивно відображають перебіг процесів старіння і рівень технічного стану конкретних деталей і вузлів.

До *п'ятої групи* належать параметри, що характеризують ступінь втоми металів, оцінюваної величиною руйнівних напружень після накопичення певної кількості циклів зміни навантаження. Про досягнення гранично допустимих напружень у конкретній деталі свідчить поява на її поверхні втомних мікротріщин, що завжди дуже небезпечно, особливо для елементів екіпажної частини рухомого складу.

Для прогнозування ресурсів і термінів служби до ремонтів, а також забезпечення необхідного рівня безвідмовності між ремонтами й технічними обслуговуваннями основних елементів конструкції рухомого складу першочергове значення має вивчення поведінки вихідних пара-

метрів *четвертої та п'ятої груп*, оскільки вихідні параметри першої, другої та третьої груп формуються та проявляються в результаті впливу саме цих груп.

Таким чином, під час визначення критеріїв граничного стану доцільно враховувати, що зміна технічного стану елемента конструкції може мати *наслідки двох видів: зниження несучої здатності деталей або зниження ефективності роботи одиниці рухомого складу, пов'язане з погіршенням вихідних параметрів першої, другої та третьої груп*. Природно, що більш небезпечними є процеси, що призводять до втрати елементами несучої здатності. Ці процеси описуються однією з двох моделей потенційної відмови – *міцнісною («міцність-навантаження»)* та *зносовою («параметр-допуск»)*. Спільним у цих двох моделях є те, що вони дають змогу побудувати прогноз у поведінці аналізованих параметрів.

Міцнісна модель («міцність-навантаження») описує зменшення руйнівних напружень до значень, що діють в елементі напружень. Для прогнозування ресурсів і для контролю технічного стану необхідно завжди використовувати зносову модель («параметр-допуск»), а величину гранично допустимого зносу встановлювати за допомогою допустимих напружень. Якщо ж побудувати зносову модель не представляється можливим, як, наприклад, у разі утворення і зростання втомних тріщин, то доводиться для прогнозування ресурсу застосовувати міцнісну модель.

Приклад 9.11. У результаті насадки бандажа на колісний центр в останньому діють напруження стиснення, а в бандажі – напруження розтягування. Під час взаємодії колеса і рейки в матеріалі бандажа виникають високі контактні напруження, а під час реалізації сил тяги і гальмування – дотичні напруження, які в сукупності спричиняють зношування поверхні катання бандажа. Під час зношування поперечний переріз бандажа зменшується. Зменшення перерізу призведе до зменшення величини граничного напруження σ_r , за якого повністю вичерпується несуча здатність бандажа і може статися його розрив.

Міцнісна модель описаного вище процесу представлена на рис. 9.15.

У початковий момент величина граничного напруження, що характеризує міцність бандажа, має розподіл $f(\sigma_r, 0)$ з математичним сподіванням і середньоквадратичним відхиленням σ_0 . Імовірнісна природа величини σ_r у початковий і наступні моменти часу пояснюється впливом як технологічних факторів посадки бандажа на колісний центр, так і випадковими факторами, пов'язаними з протіканням

процесу зношування. З плином часу ці характеристики розподілу змінюються за деякими законами, що залежать від перебігу випадкового процесу $\sigma_r(t)$.

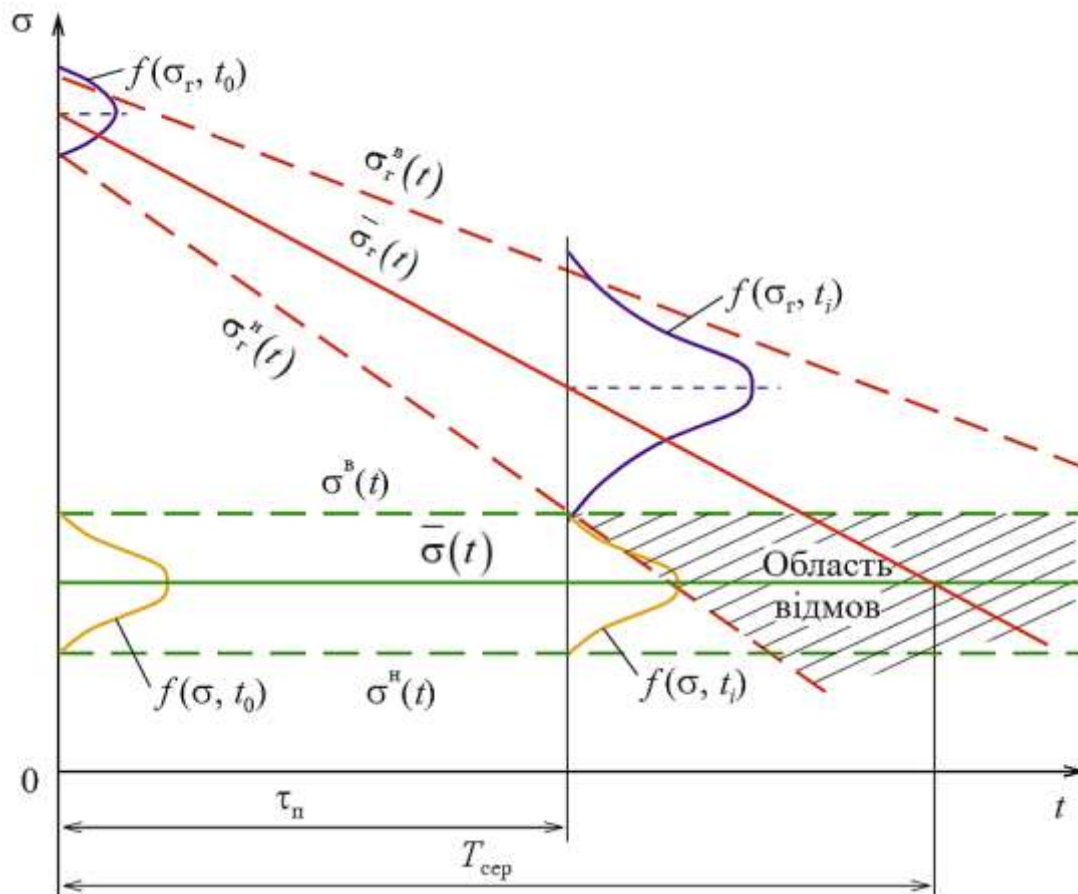


Рис. 9.15. Міцнісна модель («міцність-навантаження») поступової параметричної відмови

Якщо припустити лінійний характер зміни величини σ_r залежно від напруцювання, то можливі зміни граничних напружень будуть обмежені смугою з верхньою $\sigma_r^B(t)$ і нижньою $\sigma_r^H(t)$ межами, як показано на рис. 9.15. Навантаження σ , що діє на бандаж з боку колії, може бути представлено у вигляді випадкового стаціонарного процесу $\sigma_r(t)$ із середнім значенням $\bar{\sigma}(t)$ та верхніми й нижніми межами розкиду $\sigma^B(t)$ і $\sigma^H(t)$.

Унаслідок зниження міцності бандажа в разі збільшення наробітку вже в момент часу τ_n (див. рис. 9.15) з'являється імовірність руйну-

вання бандажа, оскільки в цей і наступні моменти $\sigma^B(t) > \sigma^H(t)$. Водночас під час розрахунку міцності за середніми значеннями $\bar{\sigma}_r$ і $\bar{\sigma}$ імовірність руйнування відсувається значно далі, тому що $T_{сер} \gg \tau_{п}$.

Значно простіше для розглядуваного процесу втрати несучої здатності бандажа використовувати *знос*ову модель, тобто залежність фактичного зносу бандажа h від часу роботи наведену на рис. 9.16.

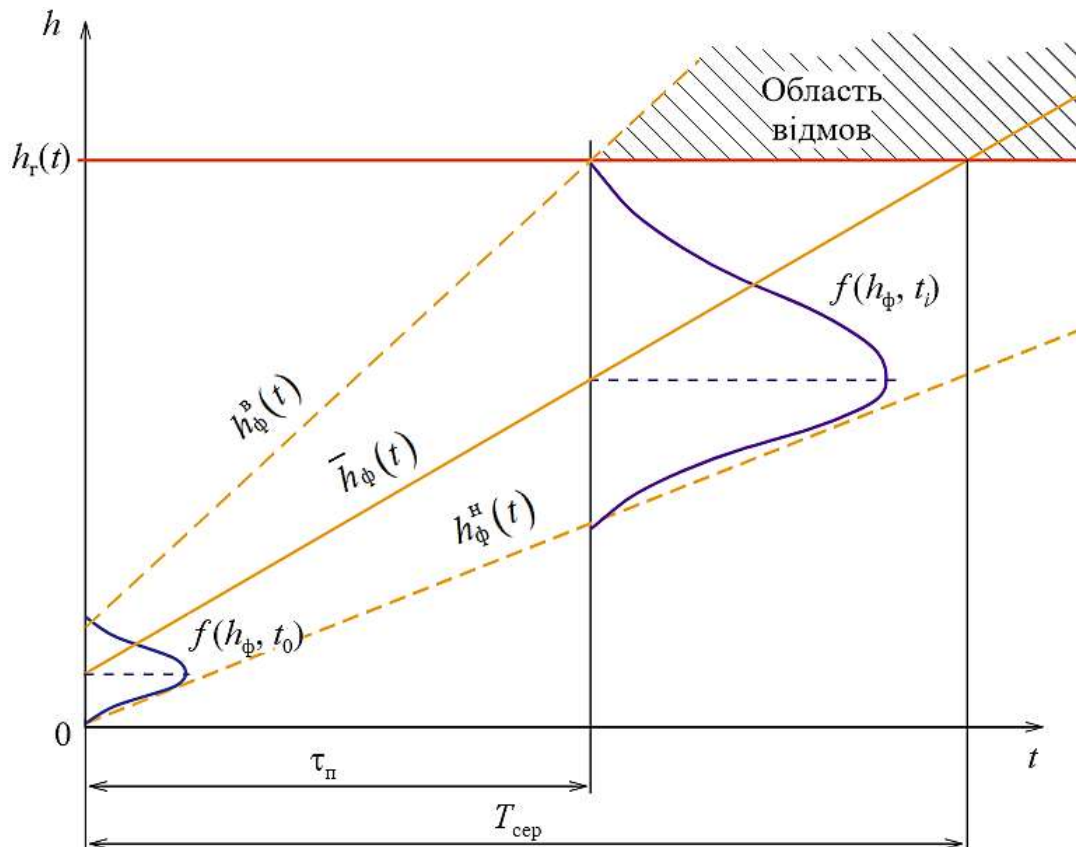


Рис. 9.16. Зносова модель («параметр-допуск») поступової параметричної відмови

Величина граничного зносу h_r залежить від конкретних умов експлуатації одиниці рухомого складу. Чим сильніший цей вплив, тим інтенсивніше змінюється граничний знос, оскільки коливання зовнішніх впливів збільшують розкид параметра h_r зі зростанням напрацювання.

Таким чином, параметри, що характеризують граничний стан, є випадковими величинами і, крім математичного сподівання, можуть характеризуватися величиною коефіцієнта варіації, відповідного певному закону розподілу напрацювання елементів до граничного стану. Рівень граничного стану, що відповідає його математичному

сподіванню, називається критичним. При досягненні критичного значення імовірність виникнення фактичної відмови дуже велика – понад 50 %. Тому за норматив обирають значення, яке в кілька разів менше за критичне. Ця величина називається призначеним рівнем граничного стану або запасу за надійністю.

Завдяки введенню в граничний стан запасу надійності досягнення призначеного рівня граничного стану відповідає досить невеликій імовірності виникнення подібних відмов в експлуатації.

9.7. Імовірнісно-фізичні моделі відмов

9.7.1. Імовірнісно-фізичний підхід до оцінювання надійності

Останніми роками дедалі більшого поширення набувають *імовірнісно-фізичні моделі надійності*, які можуть успішно замінити наявний апарат дослідження і прогнозування надійності. Імовірнісно-фізичний підхід ґрунтується на використанні законів розподілу відмов (моделей надійності), які впливають з аналізу фізичних процесів деградації і призводять до відмови. При цьому фізичні процеси деградації розглядаються у вигляді випадкових процесів. Останній підхід до дослідження надійності названо *імовірнісно-фізичним*, оскільки він безпосередньо встановлює зв'язок імовірності досягнення граничного рівня з фізичним визначальним параметром, тобто пов'язує значення імовірності відмови і фізичного параметра, що викликає відмову. Унаслідок цього параметри одержуваного імовірнісного розподілу відмов мають певний фізичний сенс. Зокрема, у розглянутих двопараметричних імовірнісно-фізичних моделях відмов параметр масштабу збігається зі значенням середньої швидкості зміни визначального параметра, а параметр форми – з коефіцієнтом варіації цієї швидкості. Розподіл відмов (розподіл напрацювання до відмови), параметри якого мають конкретну фізичну інтерпретацію, на відміну від суворо імовірнісних розподілів (моделей) відмов (експоненційного, Вейбулла, логарифмічно-нормального тощо), заведено називати *імовірнісно-фізичним розподілом (моделлю) відмов*. Зауважимо, що в літературі трапляється ціла низка різних визначень (назв) таких моделей: «фізико-статистичні», «математико-фізичні», «фізико-імовірнісні» тощо. Усі ці визначення відобража-

ють одну ідею: функція розподілу напрацювання до відмови є функцією деяких статистичних характеристик об'єкта або процесу деградації.

Під *визначальними параметрами* в даному випадку маються на увазі такі «первинні» фізичні параметри (скупчення дислокацій та інших дефектів, пластичні та пружні деформації, механічне зношення, провідність контактуючих, суцільних провідників струму, p/n переходів тощо), перевищення якими певних граничних значень призводить до відмови. Функціональні параметри, як правило, є «вторинними» характеристиками, що свідчать про витрачання ресурсу і настання відмови, але їх також успішно використовують як прогнозуючі параметри. Перші дослідники, які розвивали імовірісно-фізичний підхід, наприклад, аналізували поведінку таких функціональних визначальних параметрів, як зазор у сполученнях (механічне зношування), силу струму або напругу в напівпровідникових приладах тощо, досягнення якими певних значень розглядали як відмову виробу. Тому цей підхід більш відомий у літературі як дослідження виникнення так званих поступових або параметричних відмов.

Визначення «імовірісно-фізична» модель надійності є більш загальним, ніж визначення «параметрична» модель надійності. Є багато виробів, у яких протікають численні фізичні процеси деградації, тобто є безліч визначальних параметрів, здатних викликати відмову виробу. Наприклад, у виробів електронної техніки типу інтегральних схем практично неможливо назвати всі визначальні параметри, що викликають відмови численних компонентів, і тим паче виміряти їх. У такому разі залишається можливість тільки статистичної оцінки середньої швидкості узагальненого процесу деградації виробу. Однак, безсумнівним є те, що в цих виробках протікають фізичні процеси деградації, які визначають відповідну імовірність руйнування, тобто цим виробам відповідає певна імовірісно-фізична модель надійності.

Існують кілька схем формалізації імовірісно-фізичних моделей відмов. Далі розглядаються відомі чотири схеми формалізації. Розглянуто віяловий випадковий процес, якому відповідає альфа-розподіл; «сильно перемішаний» гауссівський процес, якому відповідає нормальний параметричний розподіл; безперервний марковський процес із

монотонними реалізаціями¹, якому відповідає дифузійний розподіл², названий DM-розподілом; безперервний марковський процес із немонотонними реалізаціями, якому відповідає дифузійний розподіл, названий DN-розподілом.

Дифузійні розподіли (а також альфа-розподіл і нормальний параметричний) як імовірісно-фізичні моделі надійності мають велику перевагу над суворо імовірнісними моделями в тому, що їхні параметри можна оцінити як на основі статистики відмов (у цьому разі їх розглядають як суворо імовірнісними моделями), так і на підставі аналізу статистичних характеристик фізичного процесу, який призводить до відмови, а також за спільного використання статистичної інформації обох типів.

Більшість задач надійності, як відомо, зрештою зводяться до оцінювання параметрів розподілу таких величин, як напрацювання до відмови, час до відмови, ресурс тощо.

Слід зазначити, що використання дифузійних розподілів у таких задачах є особливо зручним, оскільки їхній головний параметр – коефіцієнт варіації – виступає узагальненою характеристикою взаємно пов'язаних процесів, наприклад, руйнування і накопичення напрацювання.

Коефіцієнт варіації з достатньою для інженерної практики точністю можна оцінити апіорно, спираючись на багаторічні дослідження процесів зношування, міцності, втоми, а також на статистичні дані про відмови під час випробувань та експлуатації аналогічних виробів.

Завдяки наявності чіткої фізичної інтерпретації параметрів дифузійних розподілів вдалося ефективно застосувати їх для вирішення широкого кола практичних задач надійності – зокрема, розрахунку надійності систем, планування контрольних і визначальних випробувань, оцінювання довговічності, визначення потреби в запасних частинах, а

¹ Процес із монотонними реалізаціями – це стохастичний (випадковий) процес, у якому кожна окрема реалізація (тобто кожна можлива траєкторія розвитку процесу в часі) є монотонною функцією. Інакше кажучи, для будь-якого можливого розвитку подій у такому процесі, результат або: лише не спадає (тобто залишається незмінним або зростає); або лише не зростає (тобто залишається незмінним або спадає).

Типовий приклад процесу з монотонними реалізаціями – кількість мікротріщин у деталях осі колісної пари, що з часом тільки зростає. На основі спостережень за темпами зростання тріщин можна розрахувати час до критичного пошкодження й вчасно замінити деталь.

² Дифузійний розподіл – це імовірнісний розподіл, що виникає як результат опису зміни певної випадкової величини у часі за допомогою стохастичного процесу дифузійного типу. Стохастичний процес – це математична модель, яка описує випадкову зміну величин у часі або просторі; у випадку дифузійного розподілу, йдеться про безперервні процеси, що мають як детерміновану (дрейф), так і випадкову (флуктуації) складову.

також розрахунку ресурсу електронної апаратури та типових деталей машин із урахуванням характеристик міцності матеріалів і умов навантаження в часі.

На основі двопараметричних дифузійних розподілів сьогодні розроблено ефективні методи розв'язання всіх основних задач надійності елементів і технічних систем – як механічних, так і електронних – на всіх етапах життєвого циклу. Ці методи дають змогу визначати повні характеристики надійності: функції розподілу напрацювання, ресурсу, імовірність безвідмовної роботи, залишковий ресурс тощо.

Універсальність дифузійних розподілів дозволяє уніфікувати підходи до оцінювання надійності незалежно від типу виробу. Це особливо важливо для підвищення точності оцінок ще на етапі проектування, що безпосередньо впливає на підвищення надійності продукції.

Значний ефект дифузійні розподіли дають і в задачах планування контрольних випробувань. Завдяки їм обсяг необхідних випробувань зменшується у 1,5–2 рази, що дозволяє знизити витрати на 30 % і більше без втрати достовірності. Крім економії, це сприяє досягненню більш високого рівня надійності в готових виробах.

Варто також підкреслити, що математичний апарат дифузійних розподілів не лише забезпечує точніші прогностичні оцінки, ніж традиційні моделі (наприклад, експоненційна), а й охоплює ширший клас задач. Зокрема, на основі DN-розподілу можна розв'язати до 25 типових задач надійності, тоді як експоненційна модель – лише 13 із них.

Для виробів електронної техніки¹ (ВЕТ), зокрема інтегральних схем і напівпровідникових приладів, традиційні статистичні методи перевірки адекватності моделі часто непридатні через неможливість отримати повні вибірки відмов – навіть у форсованих умовах. Тому вибір відповідної моделі має базуватись не лише на статистичних критеріях, а насамперед на фізичному обґрунтуванні механізмів деградації.

Відмови є наслідком незворотних фізичних процесів, що мають випадковий характер і відбуваються під час експлуатації або зберігання виробу. Надійна модель має враховувати ці процеси як стохастичні й пов'язувати імовірність відмови з динамікою визначального фізичного параметра.

Існує кілька підходів до формалізації таких моделей – зокрема, на основі аналізу зміни визначальних параметрів у часі. Через складність

¹ Вироби електронної техніки (ВЕТ) – узагальнена назва елементів, вузлів і пристроїв електронної апаратури, таких як мікросхеми, напівпровідникові компоненти, електронні блоки тощо. Широко використовується у контексті досліджень надійності, випробувань і прогнозування ресурсу електронних систем.

опису загальних випадкових функцій у практиці зазвичай обмежуються простішими моделями, які відповідають вимогам інженерної точності та обчислювальної зручності.

9.7.2. Альфа-розподіл

Альфа-розподіл дозволяє моделювати ситуації, в яких:

- частина об'єктів швидко виходить з ладу (висока імовірність малих значень часу до відмови);
- інша частина має довгий строк служби (через важкий хвіст розподілу).

Це нерегулярний, асиметричний підхід, що особливо корисний у випадках з деградацією складних технічних систем, де класичні моделі (експоненційна або Вейбулла) не є адекватними.

Однією з перших спроб представлення процесу поведінки визначального параметра під час формалізації моделі параметричних відмов з'явилося представлення зміни визначального параметра $x(t)$, рис. 9.17, у вигляді лінійного закону (процесу віялового типу).

Схема побудови закону розподілу відмов для віялового випадкового процесу полягає у наступному. Приймають, що швидкість змінювання визначального параметра (нахил реалізацій) має апріорі відомий розподіл.

Тоді на підставі правила отримання закону розподілу функції випадкового аргументу визначають розподіл наробітку до граничного рівня $x_{гр}$ (досягнення границі області працездатності). Якщо випадковий аргумент (швидкість змінювання визначального параметра) описується нормальним розподілом, то (за схемою Кептейна) отримують α -розподіл наробітку до відмови.

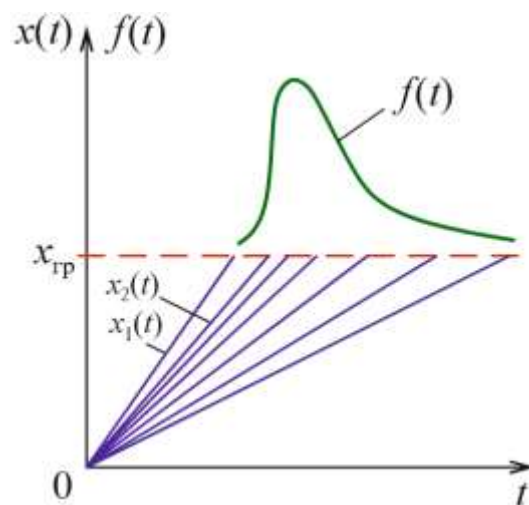


Рис. 9.17. Модель випадкового процесу деградації (віяловий процес) і схема формування розподілу наробітку до відмови (альфа-розподіл)

Взявши в якості функції $\xi(t)$ швидкість $a(t)$ і застосувавши відомі правила отримання закону розподілу функції випадкового аргументу, отримують розподіл напрацювання до заданого рівня визначального параметра, назване Г. В. Дружиніним α -розподілом, виду:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{at-1}{vat}\right), \quad (9.54)$$

де Φ – функція нормованого нормального розподілу;

a – математичне сподівання швидкості зміни визначального параметра, нормованого на граничне значення;

v – коефіцієнт варіації швидкості зміни визначального параметра.

9.7.3. Марківські процеси

Аналіз різноманітних деградаційних процесів¹ показує, що всі вони мають випадкову природу, а зміна їхніх параметрів може бути як монотонною, так і немонотонною. Складні вироби електронної техніки, наприклад інтегральні схеми, одночасно зазнають впливу багатьох процесів деградації. Ці процеси є некорельованими або слабо корельованими між собою, формуючи загальний процес деградації виробу.

Визначальні параметри деградаційних процесів, що можуть спричинити відмову будь-якого компонента (зокрема в інтегральній схемі), мають різну фізичну природу: скупчення дислокацій, пластичні деформації, довжина тріщин (втомне механічне руйнування); геометричні розміри перерізу металізації, електроопір, розміри «горбків» (електроміграція); скупчення порожнин, глибина шару непровідних інтерметалідів, провідність (інтерметалізація); провідність електролізних короткозамикальних доріжок (електролітична корозія); глибина інверсного шару, кількість поверхневих зарядів (генерація і переміщення зарядів на поверхні кристала напівпровідника) та інші.

Будь-який об'єкт (елемент або пристрій) умовно можна розглядати як сукупність (від одного до великої кількості) незалежних елемен-

¹ Деградаційні процеси – це послідовні фізичні, хімічні або механічні зміни в матеріалах чи елементах об'єкта, що відбуваються у часі та поступово погіршують їхні властивості. До них належать зношування, корозія, старіння, втома матеріалу, накопичення мікропошкоджень та інші явища, які призводять до зниження показників надійності.

тарних компонентів (ЕК), для кожного з яких визначальним є лише один фізичний параметр. Відмова будь-якого (найслабшого) ЕК призводить до відмови всього об'єкта.

Типові процеси деградації якісно зображено на рисунках 9.18 – 9.19.

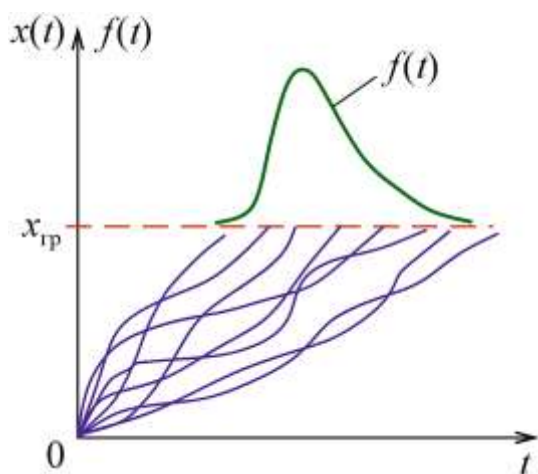


Рис. 9.18. Модель випадкового процесу деградації (марковський монотонний процес) і схема формування розподілу наробітку до відмови (DM-розподілу)

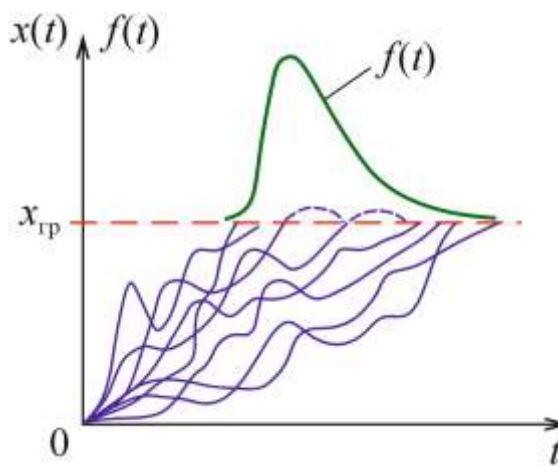


Рис. 9.19. Модель випадкового процесу деградації (марковський немонотонний процес) і схема формування розподілу наробітку до відмови (DN-розподілу)

Нормуючи всі визначальні параметри за їхніми граничними значеннями, що спричиняють відмову ЕК, можна побудувати узагальнений процес деградації виробу (сукупності ЕК) з єдиною областю значень координат і спільною шкалою часу.

Подані на рисунках множини реалізацій можуть відповідати одному складному виробу, наприклад інтегральній схемі з великою кількістю ЕК. У такому випадку реалізації процесу описують зміну визначальних параметрів окремих ЕК. Для простих елементів, таких як резистори, які складаються з одного ЕК, процес формується множиною ідентичних виробів. У загальному випадку при аналізі деградації сукупності однотипних виробів (простих і складних) кожен зразок представляє єдину реалізацію свого найслабшого ЕК.

Охарактеризуємо побудований узагальнений процес деградації виробів. Багато дослідників моделюють втомне руйнування випадковими марковськими процесами. У низці робіт обґрунтовано доцільність апроксимації механічного зносу марковським процесом. Інші розглянуті процеси деградації також є прикладами класичних марковсь-

ких процесів дифузійного типу. Існує велика кількість прикладів ефективного застосування марковських процесів для моделювання витрачання ресурсу різних технічних систем. Тому припущення про те, що узагальнений процес деградації виробів може бути описаний марковською моделлю, є цілком обґрунтованим.

З урахуванням сказаного вище вважається, що описаний процес можна апроксимувати безперервним марковським процесом дифузійного типу, тобто досліджуваний процес управляється стохастичним диференціальним рівнянням¹ першого порядку такого виду (рівняння типу Іто):

$$dx(t) = A(t)dt + B(t)d\eta(t), \quad (9.55)$$

де $x(t)$ – визначальний параметр;

$A(t)$, $B(t)$ – детерміновані функції, що характеризують зміну середнього значення і дисперсії визначального параметра (коефіцієнти знесення та дифузії);

$\eta(t)$ – випадкова складова гаусівського типу.

Завдання визначення розподілу часу до першої відмови об'єктів у цьому випадку зводиться до розв'язання задачі першого досягнення процесом (9.55) верхньої межі області (при нормованому процесі верхня границя дорівнює одиниці). Це завдання розв'язується повністю, якщо відома умовна густина імовірності переходу процесу з одного стану в інший. Для марковського процесу дифузійного типу умовна перехідна густина $\omega(t, x)$, що відповідає процесу (9.55), описується рівнянням Фоккера-Планка-Колмогорова, що являє собою диференціальне рівняння в частинних похідних такого вигляду:

$$\frac{\partial \omega(t, x)}{\partial t} + A(t) \frac{\partial \omega(t, x)}{\partial x} - \frac{[B(t)]^2}{2} \frac{\partial^2 \omega(t, x)}{\partial x^2} = 0. \quad (9.56)$$

¹ Стохастичне диференціальне рівняння – це диференціальне рівняння, у якому зміна досліджуваного параметра описується як результат поєднання детермінованої складової (середньої, закономірної тенденції зміни) та випадкової складової, що відображає вплив некерованих і випадкових чинників. У задачах надійності такі рівняння застосовують для моделювання еволюції визначального фізичного параметра елементів рухомого складу (зносу, деградації ізоляції, накопичення втомних пошкоджень) у часі з урахуванням стохастичності умов експлуатації та розсіювання властивостей матеріалів.

Під час розв'язання останнього рівняння необхідно задавати граничні умови, які залежать від виду реалізацій процесу, зокрема від їх монотонного або немонотонного характеру. Таким чином, схема формалізації, а також кінцеві вирази для моделей відмов, що відповідають монотонному або немонотонному процесу деградації, дещо відрізняються і тому розглядаються окремо.

Процес деградації механічних об'єктів унаслідок незворотності процесів руйнування (механічного зношування, втоми, втомного викришування) прийнято розглядати як процес із монотонними реалізаціями – рис. 9.18.

Процес деградації виробів електронної техніки поряд із монотонними реалізаціями (механічне руйнування) внаслідок електричних явищ має і немонотонні реалізації, тому у загальному випадку прийнято розглядати деградацію цих виробів як процес із немонотонними реалізаціями – рис. 9.19.

9.7.4. Математична модель відмов виробів електронної техніки (дифузійний немонотонний розподіл)

Процес деградації виробів електронної техніки поряд із монотонними реалізаціями (механічне руйнування) внаслідок електричних явищ має і немонотонні реалізації, тому в загальному випадку прийнято розглядати деградацію цих виробів як процес із немонотонними реалізаціями.

Для того щоб визначити вираз для закону розподілу наробітку до першої відмови, першого досягнення граничного рівня процесом, що розглядається (9.55), необхідно конкретизувати функції $A(t)$ і $B(t)$. Будемо розглядати процес деградації виробів (9.55) для сукупності однотипних виробів як однорідний, тобто з постійною середньою швидкістю і постійним середнім квадратичним відхиленням швидкості (або постійним коефіцієнтом варіації швидкості). У такому разі кінетичне рівняння процесу (9.55) можна записати у вигляді:

$$dx(t) = a dt + b d\eta(t), \quad (9.57)$$

де a – коефіцієнт зносу (середня швидкість зміни визначального параметра);

b – коефіцієнт дифузії (b^2 – середня швидкість зміни дисперсії визначального параметра).

Якщо марковський процес дифузійного типу визначається рівнянням виду (9.57), то дифузія умовної перехідної густини $\omega(t_0, x_0, t, x)$ цього процесу описується рівнянням Фоккера-Планка-Колмогорова такого виду:

$$\frac{\partial \omega(t_0, x_0, t, x)}{\partial t} + a \frac{\partial \omega(t_0, x_0, t, x)}{\partial x} - \frac{b^2}{2} \frac{\partial^2 \omega(t_0, x_0, t, x)}{\partial x^2} = 0. \quad (9.58)$$

Густина розподілу наробітку досягнення межі досліджуваним процесом (густина розподілу наробітку до відмови) має такий зв'язок з умовною густиною переходу процесу з одного стану в інший

$$f(t) = - \int_{-\infty}^1 \frac{\partial \omega(t_0, x_0, t, x)}{\partial t} dx. \quad (9.59)$$

Щоб визначити густину імовірності розподілу наробітку до відмови $f(t)$, необхідно одержати вираз для $\omega(t_0, x_0, t, x)$, розв'язавши рівняння (9.58), потім знайти часткову похідну за часом від функції $\omega(t_0, x_0, t, x)$ та отриманий вираз проінтегрувати за параметром x . Такою є схема формалізації так званих дифузійних розподілів. Їхня назва «дифузійний» зумовлена тим, що вираз для закону розподілу впливає з розв'язання рівняння дифузії імовірностей.

Рівняння дифузії імовірностей (9.58) являє собою параболічне диференціальне рівняння в частинних похідних. Для розв'язання такого типу рівнянь необхідно встановити крайові умови, які визначають із загальних фізичних міркувань про процес і шукану функцію.

Початкові умови в найзагальнішому випадку, виходячи з шуканої функції $\omega(t_0, x_0, t, x)$ (густина імовірностей), можуть бути задані, наприклад, у вигляді

$$\omega(t_0, x_0, t, x) \Big|_{t=t_0} = \omega_0(x_0), \quad (9.60)$$

де $\omega_0(x_0)$ – деякий довільний розподіл досліджуваного параметра в початковий момент.

Якщо початкове значення параметра задано (наприклад, без втрати спільності можна покласти $x_0 = 0$, $t_0 = 0$), тоді $\omega_0(x_0)$ вироджується в δ -функцію:

$$\omega(t, x)|_{t=0} = \delta(x). \quad (9.61)$$

Що стосується визначення граничних умов, то тут необхідно оцінити характер реалізацій процесу $x(t)$. Нагадаємо, що маються на увазі реалізації – зміна визначальних параметрів невідновлюваних об’єктів. Перше досягнення реалізацією межі заданої області (у нашому випадку параметр змінюється від нуля до одиниці) відповідає відмові об’єкта. За характером зміни реалізації необхідно визначити, чи моделює відмова перше досягнення реалізацією межі заданої області та чи може реалізація вплинути на досліджуваний процес $x(t)$ і, відповідно, на шукану функцію $\omega(t, x)$ надалі, після першого досягнення межі.

Якщо реалізації мають немонотонний характер, то після першого досягнення межі заданої області (фізично це відповідає відмові та зняттю виробу зі спостереження) немонотонна реалізація може знову повернутися до заданої області та брати участь у спостережуваному процесі (деякі подібні реалізації показано штриховими лініями на рис. 9.19).

Для того, щоб перше досягнення межі немонотонною реалізацією моделювало відмову, а подальша реалізація не брала участі в спостережуваному процесі та не впливала на $\omega(t, x)$, необхідно на межі заданої області поставити граничну умову типу «екран, що поглинає». У такому разі будь-яка реалізація, вперше досягнувши її, назавжди залишається на межі, поза заданою областю.

Оскільки вище було встановлено, що реалізації процесу деградації виробів електронної техніки можуть мати немонотонний характер, як граничні умови під час розв’язання рівняння (9.58) приймаються умови:

$$\omega(t, x)|_{x=-\infty} = 0; \quad (9.62)$$

$$\omega(t, x)|_{x=1} = 0. \quad (9.63)$$

Перша гранична умова (9.62) суто формальна. Оскільки досліджуваний процес (визначальний параметр виробів) не може набувати від’ємних значень, установлена ліва межа є недосяжною (природною)

і ніяк не впливає на процес у заданій області. Прийняття формальної умови (9.62) необхідне для розв'язання рівняння (9.58). Гранична умова (9.63) впливає з вищенаведених міркувань і відповідає поглинаючому екрану у точці $x = 1$.

Розв'язок рівняння (9.58) для крайових умов (9.61)–(9.63) записується у такому вигляді:

$$\omega(t, x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}\right] - \exp\left[-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}\right] \right\}. \quad (9.64)$$

Обчислюючи похідну $\frac{\partial \omega(t, x)}{\partial t}$ та підставляючи отриманий вираз у (9.59), проінтегрувавши, отримуємо вираз для густини розподілу наробітку до першої відмови

$$f(t) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2b^2 t}\right].$$

Для однорідного процесу деградації дифузійного типу коефіцієнт дифузії має простий зв'язок із зазвичай використовуваним дифузії має простий зв'язок із зазвичай використовуваними характеристиками процесу – середнім квадратичним відхиленням швидкості процесу (σ_a) і коефіцієнтом варіації процесу (v)

$$b = \frac{\sigma_a}{\sqrt{a}} = v\sqrt{a}.$$

З урахуванням останнього співвідношення можна записати вираз для закону розподілу часу до відмови в такому вигляді:

$$f(t) = f_N(t; \mu, v) = \frac{1}{vt\sqrt{2\pi at}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2v^2 at}\right]. \quad (9.65)$$

Прийнято отриманий дифузійний (*Diffusive*) розподіл (9.65), що відповідає немонотонному (*Nonmonotonic*) марковському процесу, за

першими літерами визначальних слів називати дифузійним немоно-тонним розподілом (DN-розподілом).

Густині (9.65) відповідає функція розподілу

$$F(t) = DN(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{at-1}{\nu\sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{at+1}{\nu\sqrt{at}}\right). \quad (9.66)$$

9.7.5. Математична модель відмов механічних елементів (дифузійний монотонний розподіл)

Для компонентів технічних систем, що містять електромеханічні та механічні елементи (контакти реле і роз'ємів, електричні контакти, що ковзають, підшипники, зубчасті передачі тощо), лімітуючими, зазвичай, працездатність компонентів, є механічні процеси деградації (пластичні деформації, розвиток втомних тріщин, втомне викришування, механічне зношення і т.п.).

Процес деградації механічних об'єктів унаслідок незворотності процесів руйнування (механічного зношування, втоми, контактної втоми) прийнято розглядати як марковський процес із монотонними реалізаціями (див. рис. 9.18).

Якщо процес деградації має монотонні реалізації, то перший перетин межі будь-якою реалізацією буде одночасно й останнім, тобто реалізація в надалі вже більше ніколи і ніяк не впливатиме на спостережуваний процес. Це означає, що немає необхідності у встановленні будь-яких умов на межі заданої області.

Умовну перехідну густину досліджуваного процесу $\omega(t_0, x_0, t, x)$ визначають, розв'язуючи рівняння (9.58) за таких крайових умов:

$$\omega(t, x)|_{t=0} = \delta(x); \quad (9.67)$$

$$\omega(t, x)|_{x=-\infty} = 0; \quad (9.68)$$

$$\omega(t, x)|_{x=+\infty} = 0. \quad (9.69)$$

Розв'язок (9.58) із крайовими умовами (9.67) – (9.69) має вигляд

$$\omega(t) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t} \right] \right\}.$$

Далі, використовуючи ту саму послідовність математичних операцій, що й у попередньому випадку, визначаємо вираз для густини розподілу наробітку до відмови в такому вигляді:

$$f(t) = f_M(t; \mu, \nu) = \frac{1+at}{2\nu t \sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(1-at)^2}{2\nu^2 at} \right]. \quad (9.70)$$

Густині розподілу (9.70) відповідає функція розподілу

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi \left(\frac{at-1}{\nu \sqrt{at}} \right). \quad (9.71)$$

Дифузійний (*Diffusive*) розподіл (9.70 і (9.71), що відповідає монотонному (*Monotonic*) марковському процесу, називають ДМ-розподілом (дифузійним монотонним розподілом).

9.7.6. Порівняння імовірісно-фізичних моделей відмов

Слід зауважити, що розглянуті дифузійні розподіли мають аналоги, давно відомі у світовій літературі, але поширені під різними назвами. Зокрема, DN-розподіл до констант збігається з розподілом, який був отриманий фізиками ще у 1915 році й відомий під назвами: обернений гауссівський розподіл, розподіл Вальда, розподіл Твіді, розподіл часу першого досягнення броунівським рухом із позитивним дрейфом, дифузійний розподіл тощо.

Розподіл, що до констант збігається з ДМ-розподілом, у зарубіжній літературі здебільшого відомий як розподіл Бірнбаума-Саундерса. Варто зазначити, що цей розподіл у задачах надійності було запропоновано ще до роботи Бірнбаума і Саундерса українським ученим Шукайлом. Більш того, цей розподіл з'явився ще раніше – більш ніж за 30 років до того – у працях математика Бернштейна, тому в деяких джерелах його називають також розподілом Бернштейна.

Необхідно підкреслити, що зазначені розподіли широко відомі у світовій літературі як строго імовірнісні моделі. При цьому їх формалізація здійснювалася за іншими схемами, часто більш загального характеру. У цьому розділі розглянуто три різновиди двопараметричних імовірнісно-фізичних моделей відмов (альфа-розподіл, DM-розподіл і DN-розподіл), побудованих на основі аналізу одного типу процесу деградації – стаціонарного зношування (руйнування). Усі моделі мають параметри з однаковою фізичною інтерпретацією. Однак через відмінності у схемах формалізації аналітичні вирази законів розподілу відмов і формальні властивості моделей істотно різняться. Це обумовлює необхідність їх порівняльної оцінки.

Як видно з рисунків 9.17–9.19, математичні моделі процесів деградації помітно відрізняються за своєю формою. Відмінності спостерігаються також в аналітичних виразах для законів розподілу напрацювання до відмови. Слід зауважити, що параметр часу у знаменнику аргументу функції Лапласа, який суттєво впливає на характер розподілу, має різний ступінь.

Окрім того, розглянуті моделі процесів деградації істотно різняться і за фізичною природою. Так, ідеалізований випадковий (віяловий) процес (див. рис. 9.17) визначається виключно початковим станом об'єкта (якістю виготовлення зразків) і не залежить від механіко-фізико-хімічних процесів деградації, що відбуваються під дією зовнішніх чинників і часу. Натомість марковські моделі (див. рис. 9.18–9.19) описують випадкову швидкість перебігу процесів деградації кожного зразка, де ця швидкість змінюється у процесі експлуатації внаслідок флуктуацій, обумовлених властивостями матеріалу та впливом зовнішнього середовища.

З формальної точки зору порівнювані імовірнісно-фізичні моделі відмов є двопараметричними функціями. Проте моделі дифузійних розподілів виглядають простішими, оскільки для них існують точні аналітичні вирази всіх характеристик і моментів розподілів. Натомість моменти альфа-розподілу, як відомо, визначаються наближеними залежностями, що суттєво ускладнює його практичне застосування.

Криві густин DN-розподілу та альфа-розподілу характеризуються вищим порогом нечутливості, позитивним ексцесом (гостровершинністю) і більш вираженою асиметрією порівняно з DM-розподілом. Аналіз цих кривих показує, що порівнювані розподіли мають різні області високої надійності. Це, у свою чергу, свідчить про те, що оцінка квантилів малого рівня, а отже, і призначення гамма-відсоткового ресурсу, істотно залежить від вибору моделі відмов.

Надзвичайно важливим показником, що характеризує поведінку досліджуваних об'єктів, є функція інтенсивності відмов. Інтенсивності відмов у порівнюваних моделях демонструють різні закономірності. Зокрема, усі розглянуті криві інтенсивності відмов стартують від нуля. Проте в процесі експлуатації, при $t \rightarrow \infty$, інтенсивність відмов альфарозподілу знову знижується до нуля, тоді як інтенсивності відмов дифузійних розподілів прямують до сталої величини, що дорівнює $\frac{a}{2v^2}$.

Таким чином, аналіз основних характеристик імовірісно-фізичних моделей відмов свідчить про суттєві відмінності у закономірностях, які визначають кількісні показники надійності об'єктів.

Слід зазначити, що прийнята ідеалізація процесу зміни визначального параметра (процесу деградації) і характер окремих реалізацій є основою для побудови прогнозованого процесу – розподілу часу до виходу визначального параметра за граничне значення. Адекватність математичної моделі випадкового процесу реальному процесу деградації визначає точність прогнозованого розподілу часу відмов порівняно з фактичним розсіюванням відмов генеральної сукупності. Установлення відповідності гіпотетичної моделі реальному процесу є складним завданням, особливо при порівнянні випадкових процесів.

Адекватність імовірісно-фізичної моделі відмов може оцінюватися двома шляхами: по-перше, шляхом вивчення вихідних ідеалізованих і реальних процесів деградації; по-друге, через зіставлення прогнозованого теоретичного розподілу з експериментальними даними про відмови. З практичної точки зору другий підхід є більш доцільним та інформативним.

Візуальний аналіз моделей, поданих на рис. 9.17–9.19, а також їхня фізична інтерпретація свідчать, що моделі, представлені на рис. 9.18–9.19, краще відповідають реальним процесам зміни визначального параметра. Більш глибоку перевірку адекватності моделей здійснено шляхом апроксимації експериментальних даних щодо відмов різних об'єктів.

Наведені нижче рис. 9.20–9.22 ілюструють залежності основних характеристик (F , f , λ) для різних значень параметрів дифузійних розподілів. Аналізуючи ці характеристики та аналітичні вирази для моментів розподілів, можна зробити такі висновки. Розподіли мають невід'ємні значення асиметрії та ексцесу; математичне сподівання зміщене праворуч відносно медіани. Отже, густини дифузійних розподілів є асиметричними, одномодальними кривими з видовженими правими гілками.

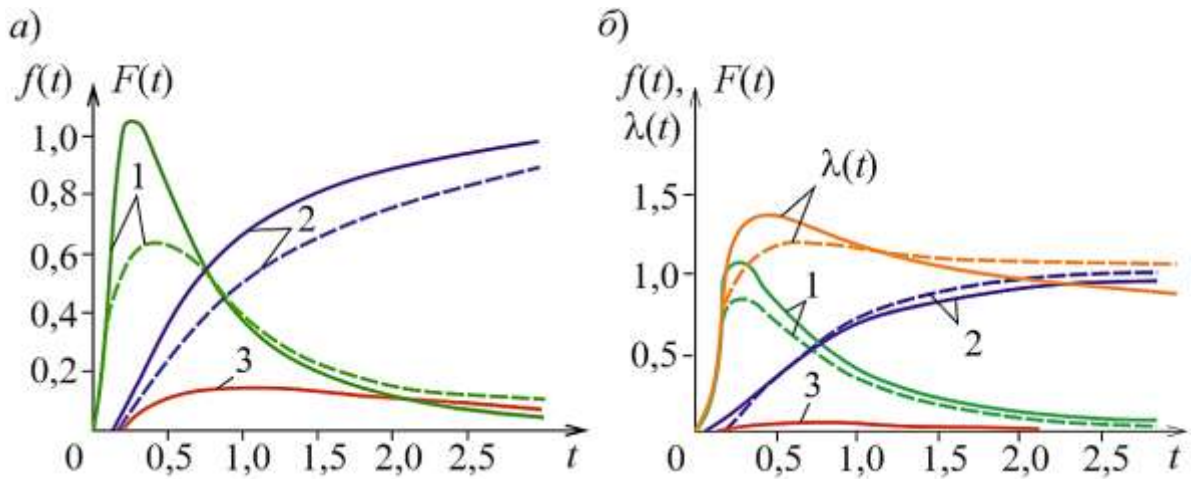


Рис. 9.20. Графіки густин (1), функцій (2) та їхніх розбіжностей (3) DM- (штрихові лінії) і DN-розподілів: а) оцінки параметрів на основі аналізу процесу деградації; б) оцінки параметрів на основі статистики відмов

За фіксованого параметра форми (коефіцієнта варіації процесу або швидкості деградації v) збільшення параметра масштабу ($\mu=1/a$) призводить до зміщення розподілу вправо по часовій осі, супроводжуваного зростанням дисперсії при незмінних коефіцієнтах асиметрії та ексцесу. Ця властивість свідчить про універсальність дифузійних розподілів і їхню стійкість до зміни швидкості деградації за умови автомодельності¹ процесу, що робить їх особливо корисними для задач форсованих випробувань.

Порівнюючи відповідні криві дифузійних розподілів між собою, можна відзначити таке. Якщо параметри розподілів оцінено на основі вивчення процесу деградації, то крива DN-розподілу має крутіший лівий фронт.

Це означає, що оцінки показників надійності, отримані на основі DN-розподілу, мають коефіцієнт запасу надійності більший, ніж при використанні DM-розподілу. На рис. 9.20, а) (крива 3) показано зміну значення другого доданка функції DN-розподілу, який визначає величину розбіжності функцій DM- та DN-розподілів, тобто збільшення імовірності відмови у зв'язку з немонотонним характером реалізацій процесу деградації.

Однак якщо параметри розподілів (DM- і DN-розподілів) оцінено на основі однієї й тієї самої статистики відмов (рис. 9.20, б), розбіжність показників стає малопомітною.

¹ Автомодельність процесу – властивість, за якої форма розподілу часу до відмови не змінюється при зміні швидкості деградації, змінюється лише масштаб по осі часу. Це дозволяє результати форсованих випробувань коректно переносити на умови реальної експлуатації шляхом масштабування часу.

На рис. 9.21 і рис. 9.22 показано зміну густини та інтенсивності відмов протягом наробітку у разі зміни параметра форми ν .

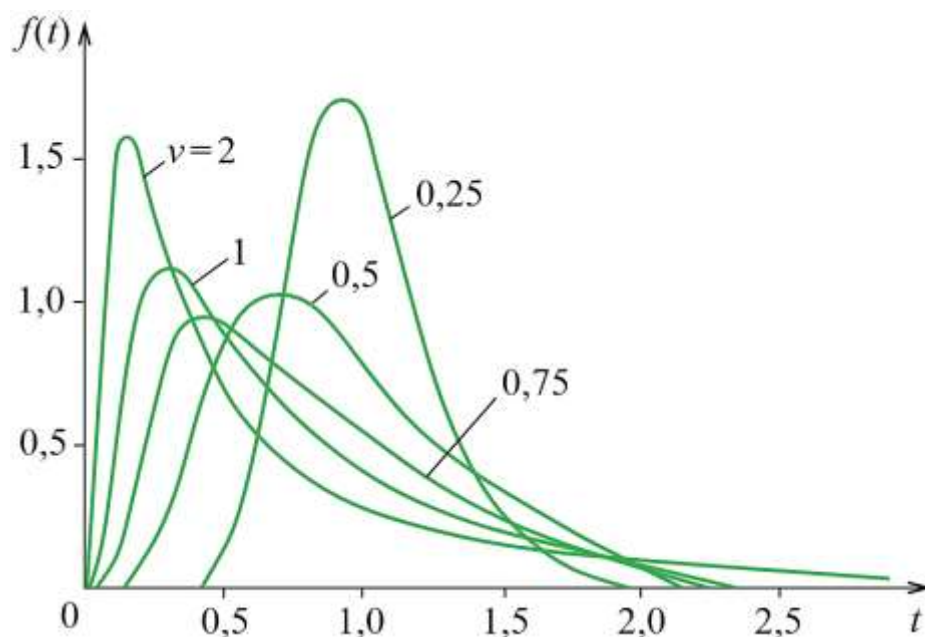


Рис. 9.21. Залежність густини DN-розподілу від параметра форми ν за $\mu = 1$

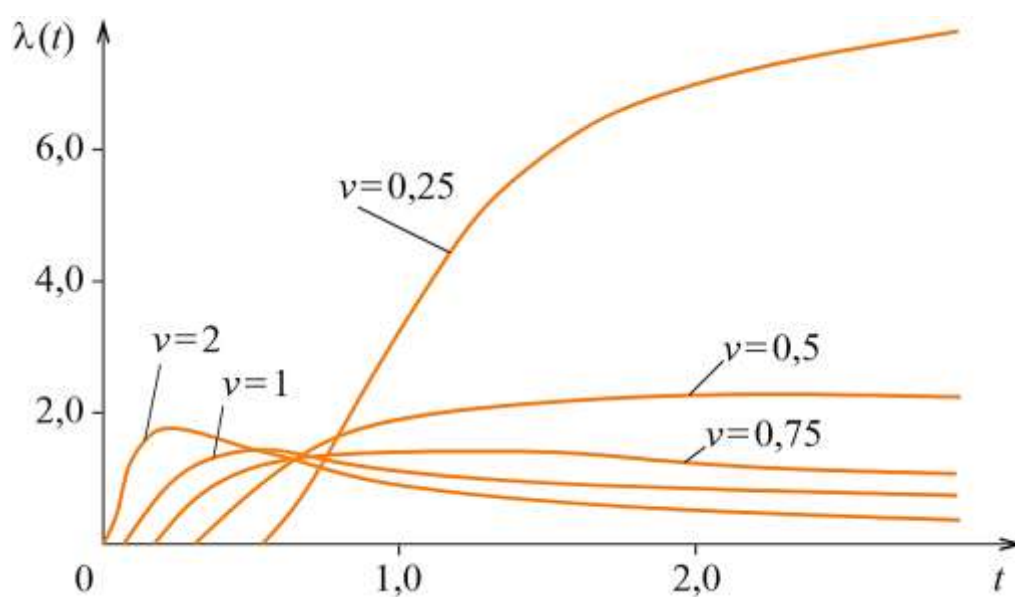


Рис. 9.22. Залежність інтенсивності відмов DN -розподілу від параметра форми ν при $\mu = 1$

Різноманітність форм кривих $f(t)$ і $\lambda(t)$ свідчить про універсальний характер дифузійних розподілів. Незважаючи на помітно

асиметричний вигляд, дифузійні розподіли, що розглядаються, асимптотично сходяться до нормального розподілу (при $v^2 \rightarrow 0$) із середнім значенням μ і дисперсією $v^2\mu^2$.

Окрему увагу слід приділити важливій характеристиці розподілів – інтенсивності відмов. Форма функції $\lambda(t)$ для обраного закону розподілу має істотне значення при розв’язанні багатьох задач, пов’язаних із надійністю. Зокрема, показник $\lambda(t)$ є надзвичайно важливим як узагальнена характеристика розподілу, що використовується під час вибору теоретичної функції розподілу.

Дослідимо поведінку інтенсивності дифузійних розподілів. Криві інтенсивності DM-розподілу $\lambda_M(t)$ і DN-розподілу $\lambda_N(t)$ починаються з нуля, тобто $\lambda_M(0) = \lambda_N(0) = 0$. Визначимо поведінку інтенсивності при $t \rightarrow \infty$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_M(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{f_M(t)}{1 - DM(t; \mu, v)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{\partial \ln f_M(t)}{\partial t} \right] = \frac{1}{2\mu v^2}.$$

Аналогічно отримуємо при $t \rightarrow \infty$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_N(t) = \frac{1}{2\mu v^2}.$$

Таким чином, функції інтенсивностей дифузійних розподілів мають кінцеву ненульову межу та є немонотонними¹.

Таким чином, інтенсивності відмов дифузійних розподілів являють собою немонотонні функції, що починаються з нуля і мають кінцеве усталене значення, що дорівнює $1/(2\mu v)^2$. Типовий вигляд цих кривих для різних значенні параметра форми v показано на рис. 9.22. За обраного масштабу рис. 9.22 немонотонність $\lambda(t)$ за малих v показати не вдається. Але аналітично вище доведено, що вона є за будь-якого v .

¹ Немонотонними називають функції, значення яких протягом зміни аргументу можуть як зростати, так і спадати. Такі функції не мають постійного напрямку зміни: зростання може змінюватися спаданням і навпаки. У випадку функцій інтенсивностей дифузійних розподілів це означає, що інтенсивність може коливатися в залежності від часу або інших параметрів.

9.7.7. Основні характеристики та властивості дифузійних розподілів

Для зручності надалі введемо деякі позначення. Позначимо параметр масштабу розглядуваних дифузійних розподілів буквою μ , значення якої дорівнює зворотній величині середньої швидкості процесу деградації $\mu=1/a$. Параметр форми ν , як зазначалося вище, являє собою коефіцієнт варіації процесу деградації (швидкості деградації). Фізичний зміст цих параметрів однаковий в обох функціях розподілів.

Запишемо вирази і позначення для розглянутих законів, які надалі використовуватимуться.

Густина DN-розподілу

$$f(t) = f_N(t; \mu, \nu) = \frac{\sqrt{\mu}}{\nu t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(1-\mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right]. \quad (9.72)$$

Інтегральна функція DN-розподілу

$$F(t) = DN(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{t+\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right). \quad (9.73)$$

Густина DM-розподілу

$$f(t) = f_M(t; \mu, \nu) = \frac{t+\mu}{2\nu t \sqrt{2\pi \mu t}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right]. \quad (9.74)$$

Інтегральна функція DM-розподілу

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right). \quad (9.75)$$

Математичне сподівання наробітку на відмову для DN-розподілу $M[T] = \mu$, а для DM-розподілу

$$M[T] = \mu \left(1 + \frac{\nu^2}{2}\right).$$

Дисперсія для DN-розподілу $D[T] = \mu^2 v^2$, а для DM-розподілу

$$D[T] = \mu^2 v^2 \left(1 + \frac{5v^2}{4} \right).$$

Коефіцієнт варіації для DN-розподілу $K_v[T] = v$, а для DM-розподілу

$$K_v[T] = v \frac{\sqrt{4 + 5v^2}}{2 + v^2}.$$

Коефіцієнт асиметрії для DN-розподілу $A_s[T] = 3v$, а для DM-розподілу

$$A_s[T] = \frac{4v(6 + 11v^2)}{(4 + 5v^2)^{3/2}}.$$

Коефіцієнт ексцесу для DN-розподілу $E_k[T] = 15v^2$, а для DM-розподілу

$$E_k[T] = \frac{6v^2(40 + 93v^2)}{(4 + 5v^2)^2}.$$

Імовірність безвідмовної роботи для:

– DN-розподілу

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}}\right);$$

– DM-розподілу

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right).$$

Інтенсивність відмов для:

– DN-розподілу

$$\lambda(t) = \frac{(vt\sqrt{2\pi t})^{-1} \cdot \sqrt{\mu} \cdot \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]}{\Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu t}}\right)};$$

– DM-розподілу

$$\lambda(t) = \frac{(t+\mu) \cdot \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]}{2vt \cdot \sqrt{2\pi\mu t} \cdot \Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right)}.$$

Як впливає з виразів для коефіцієнтів варіації розподілу наробітку до відмови (ресурсу), для DN-розподілу коефіцієнт варіації наробітку до відмови збігається з коефіцієнтом варіації процесу деградації (швидкості деградації) $K_v[T] = v$. У разі DM-розподілу коефіцієнт варіації наробітку до відмови збігається з коефіцієнтом варіації процесу деградації за умови $v = 1$, зі зменшенням v менше за одиницю або зі збільшенням більше за одиницю коефіцієнт варіації розподілу наробітку до відмови дещо менший за коефіцієнт варіації процесу деградації. За значень $v = 0,3 \dots 1,3$ максимальне відхилення $K_v[T]$ становить близько 4 %. У практиці вимірювання випадкових величин це досить висока точність.

Зазначений вище факт (збіг коефіцієнтів варіації розподілу наробітку до відмови з коефіцієнтом варіації процесу деградації) має дуже важливе прикладне значення. Зокрема, він відкриває можливість оцінювати параметр форми дифузійних розподілів на підставі аналізу статистичних характеристик процесів деградації, що призводять до відмови.

9.8. Вибір моделі відмов

Вибір моделі відмов є важливим етапом аналізу надійності технічних об'єктів і визначається наявністю або відсутністю статистичних даних щодо досліджуваної випадкової величини (наприклад, часу безвідмовної роботи).

Якщо наявна повна вибірка статистичних даних випадкової величини обсягом понад 50 значень, вид функції розподілу, що найточніше апроксимує статистичні дані, визначають шляхом порівняння кількох запропонованих функцій розподілу.

Спочатку формують декілька гіпотез щодо можливого виду функцій. Перевірку відповідності кожної гіпотези здійснюють за допомогою критеріїв згоди¹ Колмогорова, Пірсона, ω^2 або іншими. Якщо обчислені значення статистик цих критеріїв не спростовують гіпотезу відповідності для прийнятого рівня значущості, то найбільш придатну функцію розподілу обирають, додатково порівнюючи теоретичні та вибіркові значення основних статистичних характеристик – середнього, дисперсії (коефіцієнта варіації), коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, а також квантилів малого рівня. Найбільш придатною вважають ту функцію, що має менші значення критеріїв згоди та мінімальні відхилення теоретичних оцінок від відповідних вибіркових даних.

У разі відсутності достатнього обсягу статистичних даних модель вибирають на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які зумовлюють відмови досліджуваного об'єкта або його складових частин.

Якщо відмови спричинені незворотними процесами – механічним зношенням, втомою матеріалу, корозією, ерозією поверхонь, то застосовують DM-розподіл. Наприклад, DM-розподіл застосовують під час дослідження: зносу бандажів колісних пар локомотивів і вагонів під час тривалої експлуатації; втомного руйнування ресор у пружному підвішуванні екіпажної частини; корозійного руйнування елементів кузова вагонів при зберіганні на відкритому повітрі; спрацювання зубців зубчастих коліс редукторів тепловозів.

Якщо об'єкт складається як з механічних, так і з електронних або електротехнічних елементів, і відмови можуть бути спричинені як механічними процесами, так і деградацією електричних параметрів, застосовують DN-розподіл. Приклади: відмови електронних блоків систем безпеки та діагностування локомотивів, де пошкодження можуть бути спричинені як старінням електронних компонентів, так і вібраційними навантаженнями; несправності систем автоматичного регулювання гальмування з електронним керуванням, у яких причини можуть одночасно мати механічну (знос рухомих частин) та електронну природу (збої мікропроцесорних модулів); відмови апаратури локомо-

¹ Критерій згоди – статистичний метод перевірки гіпотези про відповідність емпіричного розподілу варіантів (вибіркових даних) певному теоретичному закону розподілу. Його застосовують для оцінки, наскільки спостережувані дані узгоджуються з обраною математичною моделлю (наприклад, нормальним або експоненційним розподілом).

тивних радіостанцій, зумовлені поєднанням впливу вологи, температурних перепадів та вібрації.

У разі якщо не вдається встановити переважні фізичні процеси деградації, що спричиняють відмови, як модель відмов приймають більш загальний DN-розподіл. Слід врахувати, що за однакових оцінок основних статистичних характеристик деградаційного процесу (середньої швидкості a та коефіцієнта варіації цієї швидкості v), що приймаються як оцінки параметрів дифузійних розподілів, DN-розподіл має менш оптимістичні оцінки показників надійності у порівнянні з DM-розподілом внаслідок урахування елемента випадковості (зокрема, немонотонності реалізацій). Таким чином, вибір моделі відмов є не лише статистичною задачею, а й потребує розуміння фізичних процесів, що відбуваються в об'єкті.

Типові завдання надійності, які вирішують з використанням моделей відмов, подано у табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Типові завдання надійності різних (електронних, механічних) систем рухомого складу

Завдання надійності	Моделі відмов					
	DN	DM	E	W	LN	A
1	2	3	4	5	6	7
1. Розрахунок безвідмовності невідновлюваних і нерезервованих електронних систем	+	+	+	+	–	–
2. Розрахунок безвідмовності невідновлюваних і резервованих електронних систем	+	+	–	+	–	–
3. Розрахунок безвідмовності відновлюваних і нерезервованих електронних систем	+	–	+	–	–	–
4. Розрахунок безвідмовності відновлюваних і резервованих електронних систем	+	–	–	–	–	–
5. Розрахунок норм запасних частин електронних систем	+	+	+	–	–	–
6. Розрахунок показників довговічності невідновлюваних електронних систем	+	+	+	+	–	–
7. Розрахунок показників довговічності відновлюваних електронних систем	+	–	+	–	–	–
8. Розрахунок коефіцієнта готовності	+	+	+	–	–	–
9. Розрахунок коефіцієнта оперативної готовності	+	–	+	–	–	–

Закінчення табл. 9.1

1	2	3	4	5	6	7
10. Розрахунок показників надійності (середнього і гамма-відсоткового ресурсу, імовірності безвідмовної роботи) механічних елементів на підставі характеристик міцності і навантаження	+	+	–	–	+	–
11. Розрахунок безвідмовності невідновлюваних і нерезервованих механічних систем	+	+	–	+	–	–
12. Розрахунок безвідмовності невідновлюваних і резервованих механічних систем	+	+	–	+	–	–
13. Розрахунок безвідмовності відновлюваних нерезервованих механічних систем	+	–	–	–	–	–
14. Розрахунок безвідмовності відновлюваних і резервованих механічних систем	+	–	–	–	–	–
15. Розрахунок довговічності механічних систем	+	+	–	–	–	–
16. Розрахунок норми запасних частин механічних систем	+	+	–	–	–	–
17. Планування визначальних випробувань	+	+	+	+	+	+
18. Оброблення результатів випробувань та отримання оцінок показників надійності у разі цензурованих вибірок	+	+	+	+	+	+
19. Планування контролю середніх показників надійності	+	+	+	+	+	+
20. Планування контролю гамма-відсоткових показників надійності	+	+	+	+	+	–
21. Планування контролю імовірності безвідмовної роботи	+	+	+	+	+	–
22. Планування контролю коефіцієнта готовності	+	+	+	–	–	–
23. Планування прискорених (форсованих) випробувань на надійність	+	+	–	–	–	+
24. Оцінювання показників надійності з урахуванням апіорної інформації за результатами випробувань одиничних зразків	+	+	–	–	–	+
25. Оцінювання показників надійності (параметричної надійності) об'єктів в умовах, коли немає відмов	+	+	–	–	–	+

Примітка. Знаком «+» відмічено, що розв'язання завдання можливе на підставі зазначеної моделі відмов, знаком «–» – розв'язання цього завдання на підставі зазначеної моделі неможливе; E, W, LN, A – позначення відповідно експоненційного розподілу, розподілу Вейбулла, логонормального та α -розподілу.

Найбільш поширеною математичною моделлю відмов, яку застосовують під час інженерних розрахунків показників надійності технічних систем, є однопараметричний експоненційний розподіл. Ця модель використовується переважно для визначення надійності ненадлишкових (нерезервованих) структур, де відмови елементів призводять безпосередньо до відмови всієї системи. Проте, дослідження показали, що застосування так званого λ -методу (розрахунків на підставі експоненційного розподілу) призводить до суттєвого заниження оцінок надійності систем, особливо якщо вони складаються з великої кількості елементів.

Для підвищення точності розрахунків використовують розподіл Вейбулла, на основі якого розроблено методи визначення показників безвідмовності невідновлюваних систем як нерезервованих, так і резервованих. Ці методи отримали назву методів функцій випадкових аргументів та дозволяють враховувати більш широкий спектр варіацій часу до відмови, ніж експоненційна модель.

Водночас для логарифмічно нормального розподілу та α -розподілу в даний час відсутні відпрацьовані методи розрахунку надійності систем, що обмежує їхнє практичне застосування.

Найбільш універсальними за своїми можливостями є дифузійні розподіли, на основі яких розроблені методи, що дозволяють виконувати розрахунок показників надійності як для невідновлюваних (нерезервованих і резервованих), так і для відновлюваних систем обох типів.

Серед них особливе місце займає DN-розподіл – єдина модель, що дає змогу повноцінно вирішувати всі завдання оцінювання надійності. Дещо вужчі можливості має DM-розподіл і, з певними обмеженнями, експоненційний розподіл. Найменший діапазон завдань вирішується на основі логарифмічно нормального та α -розподілу.

З точки зору складності використання, найпростішими для інженерної практики є експоненційний та нормальний розподіли, тоді як α -розподіл та розподіл Вейбулла вважаються найбільш трудомісткими у застосуванні. При цьому функції логарифмічно нормального й дифузійних розподілів є досить простими, відповідають вимогам інженерної практики та, подібно до нормального розподілу, можуть бути виражені через широко табульовану функцію Лапласа, що спрощує обчислення.

Порівняльний аналіз показує, що за сукупністю основних вимог до моделей відмов – фізична обґрунтованість, адекватність, можливість визначення показників надійності, універсальність та практична придатність – дифузійні розподіли мають перевагу над усіма іншими роз-

глянутими моделями (Вейбулла, логарифмічно-нормальним, експоненційним та α -розподілом).

Запитання до самоконтролю

1. Що лежить в основі оцінювання та прогнозування показників надійності?
2. Якими є основні причини виникнення дефектів у виробках?
3. Чим відрізняються суттєві дефекти від несуттєвих з точки зору надійності?
4. Чому відмова виробу є випадковою подією?
5. На які два основні види поділяють відмови залежно від характеру протікання процесів, що їм передують?
6. Що таке раптова відмова згідно з ДСТУ 2860-94?
7. Які фактори можуть призвести до раптової відмови?
8. Як змінюється імовірність виникнення раптової відмови залежно від часу експлуатації об'єкта?
9. Що таке поступова відмова за визначенням ДСТУ 2860-94?
10. Які фізичні процеси призводять до поступових відмов?
11. Як тривалість попереднього періоду експлуатації впливає на імовірність поступової відмови?
12. Які відмови вважаються залежними, а які – незалежними? Наведіть приклади.
13. У чому полягає різниця між функціональними і параметричними відмовами?
14. Що є критерієм параметричної відмови виробу?
15. Яке значення має класифікація і аналіз типових відмов для вдосконалення нормативно-технічної документації?
16. Як змінюється інтенсивність відмов протягом усього терміну служби виробу?
17. Які три періоди виділяють у зміні інтенсивності відмов і які їх особливості?
18. Що таке період припрацювання, і чому в ньому зменшується інтенсивність відмов?
19. Які типи ідеалізованих схем моделей відмов розглядаються у теорії надійності?
20. Яке математичне рівняння описує загальну інтегральну форму закону розподілу часу до відмови?
21. Яке фізичне значення має функція $\varphi(t)$ у загальній формулі закону розподілу?

22. Чому ідеалізовані моделі відмов не враховують розкид початкових властивостей об'єкта?
23. Що є вичерпною характеристикою випадкової величини, пов'язаної з наробітком до відмови чи ресурсом?
24. Що таке модель відмов відповідно до ДСТУ 3433-96?
25. Як модель відмов зв'язана з моделлю надійності?
26. Яке основне завдання побудови моделі надійності системи?
27. Що визначає модель надійності елемента, який зазнає зношування чи руйнування?
28. Яке значення має вибір моделі відмов для точності оцінки показників надійності?
29. На підставі чого здійснюється вибір функції розподілу як моделі відмов?
30. Які два основні підходи до побудови моделей відмов?
31. Що є основною відмінністю імовірнісних (статистичних) та імовірно-фізичних моделей відмов?
32. Які завдання з надійності вирішуються на різних етапах життєвого циклу об'єкта?
33. Які основні вимоги ставляться до функцій розподілу, що застосовуються як моделі відмов?
34. Що означає вимога фізичності моделі відмов?
35. Чому фізична обґрунтованість моделі залишається важливою навіть за наявності достатньої статистики?
36. Що означає вимога адекватності до функції розподілу як моделі відмов?
37. Яке значення має форма початкової і кінцевої частин розподілу для адекватності моделі?
38. Що таке немонотонний характер інтенсивності відмов?
39. Які функції розподілу мають властивість згортання, необхідну для розрахунку надійності відновлюваних систем?
40. Що таке універсальність моделі відмов?
41. Яку роль у підвищенні універсальності моделі відіграє можливість використання статистики деградації?
42. Що означає практична придатність моделі відмов у технічних розрахунках?
43. Які властивості мають мати функції розподілу для зручності практичного використання?
44. У який період експлуатації виробів інтенсивність відмов вважається практично постійною?

45. Які фізичні процеси можуть призводити до раптової відмови об'єкта?
46. Що вважається умовою миттєвої відмови конструктивного елемента?
47. Які властивості має процес зміни навантаження у моделі миттєвої відмови?
48. Що таке асимптотична незалежність навантаження?
49. Що таке стаціонарність навантаження у контексті моделі миттєвої відмови?
50. За якої умови відбувається відмова об'єкта у моделі миттєвої відмови?
51. Який закон розподілу описує час до відмови в моделі миттєвої відмови?
52. Яка характерна властивість експоненційного закону в контексті надійності?
53. Що змінюється в моделі миттєвих відмов із порогом чутливості порівняно зі звичайною моделлю миттєвої відмови?
54. Який фізичний процес описує зниження міцнісних властивостей об'єкта у моделі миттєвих відмов із порогом чутливості?
55. Що таке параметр порогу чутливості у моделі експоненційного розподілу?
56. Який вигляд має функція густини імовірності для моделі миттєвих відмов із порогом чутливості?
57. У яких випадках експоненційний розподіл може бути граничною статистичною моделлю часу безвідмовної роботи системи?
58. Як впливає порушення технології виготовлення на інтенсивність відмов об'єктів?
59. Яким чином визначається загальна густина розподілу часу безвідмовної роботи для об'єктів різної якості?
60. Чому в ідеальній моделі миттєвого пошкодження профілактичні заміни елементів є недоцільними?
61. Якими способами можна підвищити надійність об'єкта у моделі миттєвого пошкодження?
62. Як визначити імовірність безвідмовної роботи для заданого інтервалу часу за експоненційним законом розподілу?
63. Як обчислюється імовірність відмови в заданому проміжку часу для об'єкта наробіток якого підпорядковується експоненційному розподілу?
64. Які основні причини викликають поступові відмови та пошкодження складових рухомого складу?

65. Як проявляється втома металів і чим вона небезпечна для деталей рухомого складу?
66. Які елементи конструкцій рухомого складу найчастіше піддаються втомним руйнуванням?
67. Чим характеризується процес старіння неметалевих деталей?
68. Як виникають залишкові деформації в деталях і які їх основні типи?
69. Наведіть приклади деталей, які зазнають зминання, скручування або вигину.
70. Що таке викривлення і в яких деталях воно найчастіше виникає?
71. Як впливають різні фактори навколишнього середовища на розвиток корозії тертьових поверхонь?
72. Чому процес зношування деталей в реальних умовах є результатом комплексного впливу кількох факторів?
73. Яким чином за допомогою функції $x(t)$ описується процес поступового зношування деталей?
74. Що відображає графік залежності глибини зношеного шару підшипника від часу (рис. 9.4)?
75. Які основні фактори визначають швидкість зносу деталей?
76. Як виглядає математична модель, що описує швидкість наростання пошкоджень (γ)?
77. Які фактори враховуються у функції $\gamma = \varphi(P, v, K_t, K_e)$?
78. Що таке закон розподілу часу безвідмовної роботи і як він формується?
79. Яке значення має середня лінія $\bar{x}(t)$ у процесі аналізу зносу?
80. Які види функцій інтенсивності відмов ви знаєте і для яких процесів вони застосовуються (рис. 9.5)?
81. Який закон розподілу описує процес, коли інтенсивність відмов збільшується пропорційно часу роботи?
82. Які умови відповідають використанню закону розподілу Ерланга?
83. У яких випадках застосовуються нормальний розподіл або розподіл Вейбулла-Гнеденко для опису процесів відмови?
84. Коли для опису поступової відмови використовується гамма-розподіл часу безвідмовної роботи?
85. Для яких процесів характерний логарифмічно-нормальний розподіл часу безвідмовної роботи?
86. Що передбачає статистичний підхід до вибору моделі відмов і оцінювання надійності об'єктів?

87. Який закон розподілу використовується для моделювання раптових відмов і чому?
88. Які закони розподілу наробітку до відмови застосовуються для поступових відмов деталей?
89. Як формується функція густини імовірності відмов за експоненціальним законом?
90. Які основні властивості експоненційного закону розподілу наробітку до відмови?
91. Що означає умова постійної інтенсивності відмов для експоненційного закону?
92. Чому експоненційний закон вважається ідеалізованою моделлю для реальних об'єктів?
93. Як визначити середній наробіток на відмову та дисперсію для експоненційного закону?
94. Що означає імовірність безвідмовної роботи 0,367 за експоненціальним законом?
95. У яких випадках використовують нормальний закон розподілу у теорії надійності?
96. Які умови мають виконуватися для коректного застосування нормального розподілу?
97. Що є параметрами нормального закону розподілу і що вони характеризують?
98. Яку форму має графік функції густини імовірності для нормального розподілу?
99. Як виглядає залежність імовірності безвідмовної роботи від наробітку за нормальним законом?
100. Що таке правило трьох середньоквадратичних відхилень і яку роль воно відіграє в аналізі надійності?
101. Які імовірності відмови і безвідмовної роботи відповідають інтервалам $\pm S$, $\pm 2S$, $\pm 3S$, де S – це СКВ?
102. Чому нормальний розподіл не завжди підходить для опису відмов у реальних умовах?
103. У яких випадках нормальний розподіл може бути корисним для аналізу характеристик виробів?
104. Як визначити імовірність безвідмовної роботи і інтенсивність відмов за допомогою нормованого нормального розподілу?
105. Як використовується функція Лапласа у розрахунках імовірностей відмов?
106. Що таке нормований нормальний розподіл і чому він спрощує обчислення в інженерних задачах?

107. Які властивості має функція густини нормованого нормального розподілу?
108. Чому при розрахунках за нормальним законом вводять змінну z і що вона означає?
109. Які особливості має визначення імовірності відмови на різних інтервалах наробітку?
110. Які кроки необхідно виконати для обчислення імовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов для реального прикладу?
111. Що таке усічений нормальний розподіл і для яких випадків його застосовують?
112. Чим усічений нормальний розподіл відрізняється від класичного нормального розподілу?
113. Як визначається функція надійності для усіченого нормального розподілу?
114. Яким чином розраховується середній наробіток до відмови для усіченого нормального розподілу?
115. Наведіть приклад застосування усіченого нормального розподілу в технічних системах.
116. У яких випадках доцільно використовувати логарифмічно-нормальний розподіл для моделювання відмов?
117. Які основні властивості має логарифмічно-нормальний розподіл?
118. Як записується диференціальна функція логарифмічно-нормального закону?
119. Як визначити імовірність безвідмовної роботи для логарифмічно-нормального розподілу?
120. Які системи рухомого складу найчастіше аналізують за допомогою логарифмічно-нормального розподілу?
121. Що характеризують параметри a і b у розподілі Вейбулла-Гнеденко?
122. Які основні особливості форми кривої розподілу Вейбулла-Гнеденко при різних значеннях параметра b ?
123. Який вигляд має функція інтенсивності відмов для розподілу Вейбулла-Гнеденко?
124. У яких випадках розподіл Вейбулла-Гнеденко збігається з експоненціальним законом?
125. Як розподіл Вейбулла-Гнеденко застосовується для аналізу відмов систем дизель-генераторних установок?
126. Якими властивостями характеризується гамма-розподіл?
127. Як виглядає густина імовірності для гамма-розподілу?

128. У яких випадках гамма-розподіл наближається до нормального розподілу?
129. Яке фізичне значення має параметр форми b у гамма-розподілі?
130. Які типові види відмов описуються гамма-розподілом?
131. Коли гамма-розподіл перетворюється на експоненційний розподіл?
132. Що таке розподіл Релея і для аналізу яких елементів він найчастіше використовується?
133. Як виглядає функція інтенсивності відмов для розподілу Релея?
134. Які особливості має імовірність безвідмовної роботи за розподілом Релея?
135. Як залежить інтенсивність відмов за законом Релея від часу наробітку?
136. Яке місце в теорії та практиці надійності займають поступові (параметричні) відмови?
137. Що приймається за критерій параметричної відмови?
138. Чому досягнення граничного стану не завжди свідчить про відмову в експлуатації?
139. Як визначаються ознаки (критерії) граничного стану елементів конструкції?
140. На які групи поділяються вихідні параметри для оцінки технічного стану одиниці рухомого складу?
141. Якими особливостями характеризуються вихідні параметри першої групи?
142. Чому параметри другої групи не завжди дозволяють точно оцінити технічний стан вузлів і деталей?
143. Які вихідні параметри входять до третьої групи і які несправності вони допомагають виявити?
144. Чим відрізняються вихідні параметри четвертої групи від інших груп?
145. Які параметри належать до п'ятої групи і чим небезпечні втоми мікротріщини?
146. Чому саме параметри четвертої і п'ятої груп мають першочергове значення для прогнозування ресурсу елементів?
147. Які особливості має міцнісна модель («міцність-навантаження») поступової параметричної відмови?
148. Чому для прогнозування ресурсу перевагу надають зносовій моделі («параметр-допуск»)?

149. У чому полягає приклад застосування міцнісної моделі для бандажа колеса?
150. Як змінюється граничне напруження бандажа з часом і наробітком?
151. Які переваги має використання зносової моделі для аналізу технічного стану бандажа?
152. Що таке критичний рівень граничного стану і як він співвідноситься з імовірністю відмови?
153. Чому в нормативні значення граничного стану вводиться запас надійності?
154. Як наявність запасу за надійністю впливає на експлуатаційну безпеку рухомого складу?
155. У чому полягає суть імовірнісно-фізичного підходу до оцінювання надійності?
156. Яким чином фізичні процеси деградації враховуються в імовірнісно-фізичних моделях?
157. Що мають спільного параметри імовірнісно-фізичних моделей і фізичні властивості об'єктів?
158. Чим визначальні параметри відрізняються від функціональних у контексті аналізу деградації?
159. Чому імовірнісно-фізичні моделі вважаються більш загальними, ніж параметричні?
160. Які основні схеми формалізації імовірнісно-фізичних моделей відмов розглядаються в тексті?
161. Які переваги мають дифузійні розподіли порівняно із суворо імовірнісними моделями?
162. Чому коефіцієнт варіації є важливим параметром дифузійних розподілів?
163. Як дифузійні розподіли сприяють економії витрат на контрольні випробування?
164. Чому для виробів електронної техніки вибір моделі має ґрунтуватися на фізичних процесах деградації?
165. Що моделює альфа-розподіл і в яких випадках його доцільно використовувати?
166. Яке припущення лежить в основі побудови альфа-розподілу для моделювання параметричних відмов?
167. Що таке віяловий процес і як він пов'язаний із моделлю деградації?
168. Які фізичні параметри визначають процес деградації в інтегральних схемах?

169. Чому деградаційні процеси в складних виробках описуються як сукупність незалежних елементарних компонентів?
170. Яке рівняння описує узагальнений процес деградації за марковською моделлю?
171. Що таке рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова і для чого воно використовується?
172. Яка різниця між процесами з монотонними та немонотонними реалізаціями?
173. Як вибираються граничні умови для задачі першого досягнення межі в моделюванні деградації?
174. У чому полягає сутність дифузійного немонотонного розподілу (DN-розподілу)?
175. Як фізичні параметри процесу деградації впливають на вигляд DN-розподілу?
176. Які механічні процеси деградації найчастіше лімітують працездатність електромеханічних і механічних елементів технічних систем?
177. Чому процес деградації механічних об'єктів розглядають як марковський процес із монотонними реалізаціями?
178. Які крайові умови використовуються для розв'язання рівняння дифузії імовірностей у випадку монотонних процесів деградації?
179. Що таке DM-розподіл і яка фізична інтерпретація його параметрів?
180. Чим DN-розподіл відрізняється від DM-розподілу?
181. Які аналогії існують між розглянутими дифузійними розподілами та відомими у світовій літературі розподілами?
182. Чому альфа-розподіл вважається менш зручним для практичного застосування порівняно з дифузійними розподілами?
183. Як фізична природа процесу деградації впливає на вибір моделі відмов?
184. У чому полягають основні відмінності у поведінці функції інтенсивності відмов для різних імовірнісно-фізичних моделей?
185. Що означає, що функції інтенсивностей дифузійних розподілів мають немонотонний характер?
186. Як зміна параметра форми ν впливає на густину та інтенсивність відмов для DN-розподілу?
187. Що таке автотельність процесу деградації і чому ця властивість важлива для прискорених випробувань?

188. Чим обумовлена відмінність у характеристиках розподілу при оцінці параметрів на основі процесу деградації та на основі статистики відмов?

189. Які висновки можна зробити щодо асиметрії і ексцесу дифузійних розподілів?

190. Які вирази використовуються для математичного сподівання і дисперсії наробітку до відмови для DM- і DN-розподілів?

191. Як визначається імовірність безвідмовної роботи для DM- і DN-розподілів?

192. Яким є фізичний зміст параметра масштабу та параметра форми в дифузійних розподілах?

193. Чому збіг коефіцієнтів варіації розподілу наробітку до відмови з коефіцієнтом варіації процесу деградації має важливе прикладне значення?

194. Як можна використовувати статистичні характеристики процесу деградації для оцінки параметрів дифузійних розподілів?

195. Що визначає вибір моделі відмов і від чого він залежить?

196. Яким чином обирають вид функції розподілу за наявності достатньої вибірки статистичних даних?

197. Які критерії згоди застосовують для перевірки відповідності статистичних даних гіпотезам про вид функції розподілу?

198. Які статистичні характеристики порівнюють під час вибору найбільш придатної функції розподілу?

199. Як обирають модель відмов у разі недостатнього обсягу статистичних даних?

200. Для яких типів фізичних процесів деградації доцільно застосовувати DM-розподіл?

Розрахунок та аналіз структурної надійності рухомого складу, його вузлів та деталей

10.1. Загальні положення з розрахунку структурної надійності

Досі при визначенні надійності рухомого складу не враховували складність його устрою. Однак різні вузли й деталі рухомого складу мають різну надійність.

Задані вимоги до рівня надійності рухомого складу можуть бути забезпечені тільки в тому разі, якщо всі елементи або підсистеми, що складають його конструкцію, зможуть забезпечити ці вимоги. Тому для конкретизації показників надійності таких складних пристроїв, яким є рухомий склад, його умовно ділять на елементи та системи.

Такий поділ дасть змогу розрахувати показники надійності рухомого складу загалом і його систем, складальних одиниць під час їх варіантного проєктування з метою зіставлення розрахункових значень із заданими в технічному завданні, а також для вибору оптимальних варіантів конструкції.

Елементом називається частина системи, яка не має самостійного експлуатаційного призначення і виконує в системі обмежені функції. Для практичного використання будь-якого елемента його необхідно з'єднати з іншими елементами в певну систему.

Системою називається сукупність спільно діючих пристроїв, що забезпечують виконання певних практичних завдань.

Залежно від постановки завдання можна один і той самий об'єкт розглядати як елемент або як систему. Наприклад, під час оцінювання надійності тепловоза його розглядають як систему, що складається з основних елементів: дизеля, тягового генератора, випрямляча, охолоджувальних систем, тягових електродвигунів, допоміжних пристроїв і систем регулювання та управління. Під час оцінки надійності електровоза постійного струму його розглядають як систему, що складається з ос-

новних елементів: струмоприймача, швидкодіючого вимикача, пускових резисторів, тягових двигунів тощо. Коли ж визначають надійність, наприклад, тягового двигуна, який відносно локомотива загалом є елементом, його розглядають як систему, що складається з основних елементів: якоря, остова, щіткового апарату, полюсів тощо. Під час оцінки надійності якоря тягового двигуна його розглядають теж як систему, що складається з вала, якірної втулки, сердечника, колектора, секції обмотки тощо. Аналогічним способом заведено розглядати, наприклад, колектор як систему, утворену комплектом елементів, що містить набір пластин, коробку, міжламельну ізоляцію, низку ізоляційних деталей, натискну шайбу, стяжні болти тощо. Під час оцінювання надійності вантажного вагона його розглядають як систему, що складається з основних елементів: кузова, рами, візків, буксових вузлів, гальмової системи, автозчепу та елементів підвіски. Під час оцінки надійності пасажирського вагона його розглядають як систему, що складається з основних елементів: кузова, дверей, вікон, систем кондиціонування, гальмової апаратури, візків та електрообладнання. Коли ж визначають надійність, наприклад, візка вагона, який відносно вагона загалом є елементом, його розглядають як систему, що складається з основних елементів: рами візка, колісних пар, ресорного підвішування, буксових вузлів, гальмових механізмів тощо. Під час оцінки надійності буксового вузла його розглядають теж як систему, що складається з букси, підшипників кочення, ущільнювальних пристроїв, кришок та елементів кріплення. Аналогічним способом заведено розглядати, наприклад, підшипник букси як систему, утворену комплектом елементів, що містить кільця, тіла кочення, сепаратор, мастило та ущільнювальні елементи.

Завдяки умовному поділу на елементи і системи можна досить просто і з прийнятною для практики точністю побудувати методику розрахунку складних систем.

За характером впливу відмов на виконання певної задачі в процесі застосування за призначенням системи поділяють на прості та складні. *Проста система* в разі відмови елементів або повністю припиняє виконання своїх функцій, або продовжує виконувати свої функції в повному обсязі, якщо елемент, що відмовив, замінюють резервним.

Складні системи в результаті наявності в них функціональної надмірності в разі відмови окремих елементів і підсистем можуть виконувати свої функції за деякого зниження характеристик ефективності. Відмова складної системи визначається як подія, зумовлена виходом характеристик ефективності за нижню допустиму межу, і пов'язане з нею часткове або повне невиконання завдання.

Відповідно до наведених вище визначень одиниця рухомого складу, природно, є складною системою, оскільки має певні запаси за параметрами своїх двигунів і механізмів. Так, наприклад, у разі відмови одного тягового електродвигуна локомотив може вивести состав з перегону, але з відхиленням від норми часу. У разі відмови системи автоматичного регулювання потужності дизеля можна перейти на ручне регулювання, але з втратою ефективності та перевитратою палива. Таким чином, аналіз надійності складних систем у процесі експлуатації повинен проводитися в умовах, коли безвідмовність тих чи інших елементів конструкції рухомого складу може змінюватися, тобто необхідно вводити в розгляд динамічні моделі, що під час проектування (за нестачі експериментальної інформації) становить певні труднощі. З огляду на це, під час формування структурних схем і призначення вимог до рівня надійності технічної системи та її основних елементів їх розглядають у вигляді простих систем.

Аналіз надійності простих систем знаходить широке застосування під час проектування, коли намічається можливий склад устаткування і призначаються рівні надійності підсистем та елементів, тобто це певна форма попереднього аналізу, коли показники надійності елементів або підсистем приймають умовно незмінними в заданому інтервалі напруження. У міру переходу проектування на заключні етапи може виконуватися більш детальний аналіз і, нарешті, після виготовлення дослідних зразків під час проведення випробувань рівень надійності елементів уточнюється.

Таким чином, попередній аналіз надійності простих систем полягає у формуванні статичних моделей, коли принципова блок-схема системи замінюється на структурну. *Метод структурних схем*¹ полягає в тому, що реальна система відображається структурною схемою подій безвідмовної роботи елементів, яка складається із суми послідовних і паралельних з'єднань ланок. Під час такого аналізу, що вимагає розбиття складних систем на підсистеми й елементи, припускають, що кожний елемент може перебувати тільки в одному з двох станів: правильному або в стані відмови. Для цього використовують поняття функціонального або логічно послідовного, паралельного і змішаного з'єднань елементів у схемі. Слід пам'ятати, що ці терміни теорії надійності, які характеризують функціональну залежність елементів у розглянутій схемі, відрізняються за своєю сутністю від аналогічних понять,

¹ Структурна схема надійності – це графічне або логічне відображення структури об'єкта (системи, пристрою, машини), що показує, яким чином окремі елементи взаємодіють між собою з точки зору забезпечення працездатності або відмовостійкості.

прийнятих в електротехніці, що характеризують реальне електричне з'єднання елементів.

Структура блок-схеми конкретної системи залежить від виду виконуваних елементами функцій і від того, як впливає відмова того чи іншого елемента на робочі характеристики системи. Якщо відмова елемента призводить до відмови всієї системи, то цей елемент зображають у структурній схемі як ланку, включену в схему послідовно з іншими ланками. У тому разі, коли відмова елемента не призводить до відмови системи, то його зображують у вигляді ланки, включеної паралельно.

Послідовне і паралельне з'єднання елементів розглядаються тільки з погляду забезпечення безвідмовності роботи аналізованої принципової схеми системи, і їх не слід ототожнювати з послідовним і паралельним з'єднаннями в електричних схемах.

Приклад 10.1. Система складається з двох електричних діодів D1 і D2 увімкнених паралельно, як показано на рис. 10.1, а). Для відмов типу «коротке замикання» система вибуває з ладу тоді, коли відмовить будь-який із двох діодів, структурна схема у цьому випадку зображена на рис. 10.1, в). Тому з точки зору забезпечення безвідмовності системи діоди мають бути включені послідовно.

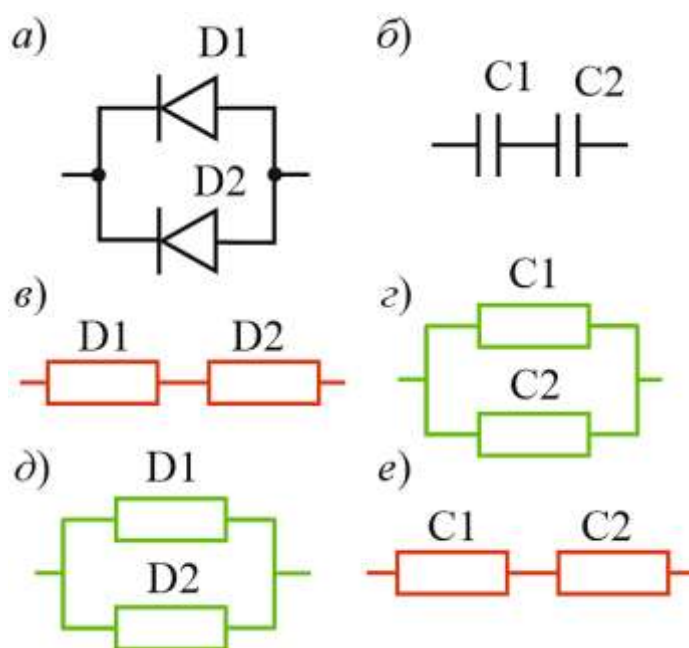


Рис. 10.1. Принципові електричні схеми з'єднання елементів (а, б) і відповідні їм структурні схеми безвідмовності в режимах «коротке замикання» (в, з) і при обриві кола (д, е)

Водночас у разі короткого замикання двох конденсаторів C1 і C2, увімкнених в електричній схемі послідовно (рис. 10.1, б), система залишається цілком працездатною, тобто з погляду забезпечення надійності в структурній схемі конденсатори мають бути включені паралельно.

льно, рис. 10.1, *з*). Водночас у разі обриву електричного кола зазначених вище елементів, структурні схеми їхньої безвідмовності зміняться на зворотні – рис. 10.1, *д*) та *е*).

На рис. 10.2 наведено принципову схему енергетичного кола однієї секції тепловоза з передачею змінно-постійного струму. Оскільки вихід з ладу будь-якого елемента представленої системи призводить до відмови локомотива, то на структурній схемі безвідмовності всі елементи з'єднані послідовно і повинні працювати безвідмовно протягом установленого наробітку (див. рис. 10.2, *в*). Якщо виникає необхідність у більш детальному розгляді безвідмовності елементів, що складають конструкцію колісно-моторного блока (КМБ), то цей елемент може бути розчленовано на простіші елементи: тяговий електродвигун (ТЕД), тяговий редуктор (ТР), колісна пара (КП) (див. рис. 10.2, *б*). Під час дослідження рівня безвідмовності тягового редуктора як системи його також можна розчленувати на простіші елементи: корпус, зубчасте колесо, шестерню, підшипники, кришки, ущільнення тощо.

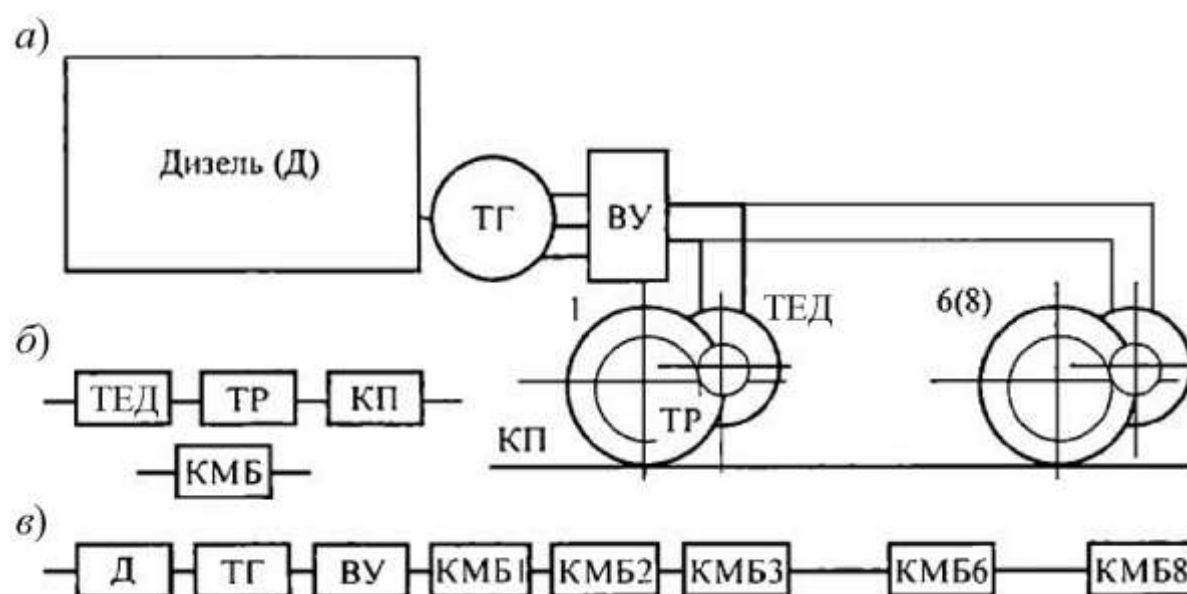


Рис. 10.2. Схема енергетичного кола секції тепловоза з передачею змінно-постійного струму: *а*) функціональна; *б*) структурна для колісно-моторного блока; *в*) структурна для секції локомотива з двома тривісними або чотиривісними візками

Таким чином, залежно від поставленого завдання і методів його вирішення принципові схеми будь-якої технічної системи в кожному

конкретному випадку з необхідним ступенем деталізації можуть бути представлені у вигляді структурних схем безвідмовності.

Залежно від повноти врахування факторів, що впливають на роботу виробу, розрізняють *попередній, орієнтовний і остаточний* розрахунок показників структурної надійності.

Попередній розрахунок показників надійності ґрунтується на таких припущеннях:

- усі елементи виробу рівнонадійні;
- інтенсивність відмов усіх виробів не залежить від часу, тобто $\lambda = \text{const}$;
- відмова будь-якого елемента призводить до відмови всього виробу.

Попередній розрахунок показників надійності виконують у наступних випадках:

- у разі перевірки вимог щодо надійності, висунутих замовником у технічному завданні на проектування виробу;
- під час розрахунку нормативних даних щодо надійності окремих блоків і пристроїв системи;
- для визначення мінімально допустимого рівня надійності елементів проєктованого виробу;
- у разі порівняльній оцінці надійності окремих варіантів виробу на етапі ескізного проєктування.

Попередній розрахунок показників надійності дає змогу судити про принципову можливість забезпечення необхідної надійності виробу.

Орієнтовний розрахунок показників надійності враховує вплив на надійність тільки кількості й типу елементів, що входять у систему, і ґрунтується на таких припущеннях:

- усі елементи даного типу рівнонадійні, тобто величини інтенсивності відмов λ_i для цих елементів однакові;
- усі елементи працюють у номінальному (нормальному) режимі, передбаченому технічними умовами;
- інтенсивності відмов усіх елементів не залежать від часу, тобто протягом терміну служби в елементів, що входять у виріб, відсутнє старіння і знос, отже $\lambda_i(t) = \text{const}$;
- відмови елементів виробу є подіями випадковими і незалежними;
- усі елементи виробу працюють одночасно.

Для визначення показників надійності виробу необхідно знати:

- вид з'єднання елементів;
- типи елементів, що входять у виріб, і кількість елементів кожного типу;

– величини інтенсивностей відмов елементів λ_i , що входять у виріб.

Вибір λ_i для кожного типу елементів зазвичай здійснюють за відповідними таблицями, наведеними в довідниках з надійності.

Таким чином, під час орієнтовного розрахунку показників надійності необхідно знати структуру системи, номенклатуру застосовуваних елементів та їхню кількість.

Орієнтовний метод розрахунку показників надійності використовують на етапі ескізного проєктування та дає змогу намітити шляхи підвищення надійності виробу.

Остаточний (повний) розрахунок показників надійності виробу виконують тоді, коли відомі реальні режими роботи елементів після випробування в лабораторних умовах основних вузлів і макетів виробу.

Елементи виробу перебувають зазвичай у різних режимах роботи, що сильно відрізняються від номінальної величини. Це впливає на надійність як виробу в цілому, так і окремих його складових частин. Виконання остаточного розрахунку показників надійності можливе тільки за наявності даних про коефіцієнти навантаження окремих елементів і за наявності графіків залежності інтенсивності відмов елементів від їхнього навантаження, температури довкілля та інших факторів, тобто для остаточного розрахунку необхідно знати залежності

$$\lambda^c = f(K_n, T, \dots).$$

Ці залежності наводять у вигляді графіків або їх можна обчислити за допомогою так званих поправочних коефіцієнтів інтенсивності відмов k_i , що дають змогу врахувати вплив різних факторів на надійність виробу.

Для визначення показників надійності виробу необхідно знати:

- кількість елементів із розбивкою їх за типами і режимами роботи;
- залежності інтенсивності відмов елементів λ_i від режиму роботи і заданих зовнішніх умов;
- структуру системи.

У загальному випадку інтенсивність відмов λ_i залежить від наступних факторів, що впливають:

- режиму роботи даного елемента;
- навколишньої температури;
- вібраційних впливів;
- механічних ударів;
- лінійних прискорень;

- вологості;
- впливу морської води;
- впливу біологічних чинників (грибок, цвіль, комахи);
- тиску;
- впливу електромагнітних хвиль;
- радіоактивне випромінювання і низки інших чинників.

Знання залежності інтенсивності відмов від факторів, що впливають, є необхідним для правильного використання елементів з метою отримання заданої імовірності безвідмовної роботи за час t .

Під час розроблення та виготовлення елементів зазвичай передбачаються певні, так звані «нормальні» умови роботи. Інтенсивність відмов елементів у «нормальному» режимі експлуатації називається *номінальною інтенсивністю відмов* $\lambda_{\text{нi}}$.

Інтенсивність відмов елементів під час експлуатації в реальних умовах λ_i дорівнює номінальній інтенсивності відмов $\lambda_{\text{нi}}$, помноженій на поправочні коефіцієнти k_i , тобто

$$\lambda_i = \lambda_{\text{нi}} k_1 k_2 \dots k_n = \lambda_{\text{нi}} \prod_{i=1}^n k_i ,$$

де $\lambda_{\text{нi}}$ – інтенсивність відмов елемента, що працює в нормальних умовах за номінальному навантаженні;

$k_1, k_2, \dots, k_n$ – поправочні коефіцієнти, що залежать від різних факторів.

Повний розрахунок показників надійності застосовується на етапі технічного проектування виробу.

10.2. Визначення показників безвідмовності за різні схеми з'єднання елементів у системі

Метод структурних схем ґрунтується на поданні складної події (безвідмовності роботи системи) як поєднання елементарних подій (безвідмовної роботи елементів) за припущення, що елементарні події, пов'язані з відмовами елементів, відбуваються незалежно одна від одної.

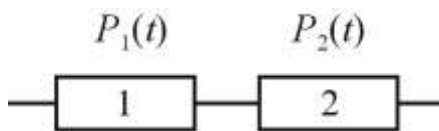


Рис. 10.3. Схема безвідмовності з послідовно функціонуючими елементами

Система, що складається з кількох незалежних елементів, пов'язаних функціонально таким чином, що відмова будь-якого з них спричиняє відмову системи, відображається розрахунковою структурною схемою безвідмовної роботи з послідовно сполученими подіями безвідмовної роботи елементів. Наприклад, є два послідовно сполучених елемента із заданими значеннями імовірності безвідмовної роботи $P_1(t)$ і $P_2(t)$ (рис. 10.3).

Користуючись теоремою про імовірність добутку незалежних випадкових подій, імовірність безвідмовної роботи послідовної системи $P_c(t)$ можна подати у вигляді:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t). \quad (10.1)$$

Імовірність відмов

$$Q_c(t) = F_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - P_1(t) \cdot P_2(t). \quad (10.2)$$

Інтенсивність відмов

$$\begin{aligned} \lambda_c(t) &= -\frac{P'_c(t)}{P_c(t)} = -\frac{P'_1(t) \cdot P_2(t) + P_1(t) \cdot P'_2(t)}{P_1(t) \cdot P_2(t)} = \\ &= -\frac{P'_1(t)}{P_1(t)} - \frac{P'_2(t)}{P_2(t)} = \lambda_1(t) + \lambda_2(t). \end{aligned} \quad (10.3)$$

Оскільки імовірність безвідмовної роботи кожного елемента, що становить систему, завжди менша за одиницю, то з аналізу рівняння (10.1) випливає, що чим більше у виробі послідовно з'єднаних елементів, тим нижча надійність системи. При цьому надійність системи завжди менша за надійність найбільш ненадійного елемента.

Якщо прийняти, що час роботи до відмови елементів системи підпорядковується експоненційному закону розподілу, то записані вирази (10.1–10.3) перетворяться до вигляду:

$$P_c(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]; \quad (10.4)$$

$$Q_c(t) = F_c(t) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = 1 - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]; \quad (10.5)$$

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2; \quad (10.6)$$

середній час безвідмовної роботи

$$T_c = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 + t_2}, \quad (10.7)$$

де t_1, t_2 – величини середнього напрацювання до відмови елементів, що складають систему.

Вирази (10.4–10.7) неважко узагальнити і для n простих, послідовно з'єднаних елементів

$$P_c(t) = \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right]; \quad (10.8)$$

$$Q_c(t) = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right]; \quad (10.9)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad (10.10)$$

$$T_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (10.11)$$

З аналізу рівнянь (10.8–10.11) випливає, що для того, щоб забезпечити необхідну технічними умовами імовірність безвідмовної роботи системи $P_c(t)$ у разі збільшення кількості послідовно з'єднаних елементів, необхідно знижувати величину інтенсивності відмов кожного елемента або, що те ж саме, вживати заходів для підвищення величини їхнього середнього наробітку до відмови, що те ж саме, вживати заходів для підвищення величини їхньої імовірності безвідмовної роботи.

Приклад 10.2. Наприкінці 80-х років намітилася тенденція до переходу на випуск потужних секцій тепловозів у восьмивісному виконанні. Як у цьому разі мають змінитися вимоги до безвідмовності тільки одного елемента їхньої конструкції, а саме, колісно-моторного блоку (КМБ), для забезпечення рівня надійності шестивісних секцій?

Величина середнього наробітку на відмову одного КМБ тепловозів на той час становила близько $L_i = 175 \cdot 10^3$ км, що відповідало величині інтенсивності відмов $\lambda_i = 1/L_i = 1/175 \cdot 10^3 = 5,71 \cdot 10^{-6}$ км⁻¹. У цьому разі величини інтенсивностей відмов систем КМБ шести- і восьмиосьової секцій, відповідно до (10.10), становлять

$$\lambda_6 = \sum_{i=1}^6 \lambda_i = (6 \cdot 5,71) \cdot 10^{-6} = 34,26 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1};$$

$$\lambda_8 = \sum_{i=1}^8 \lambda_i = (8 \cdot 5,71) \cdot 10^{-6} = 45,68 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1}.$$

За формулами (10.8) і (10.9) знаходяться відповідні значення імовірності безвідмовної роботи та імовірності відмов системи КМБ під час наробітку між ТО-3, значення якого приймаємо $l_{\text{ТО-3}} = 8 \cdot 10^3$ км

$$P_6(8000) = \exp \left[- \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot l_{\text{ТО-3}} \right] = \exp \left[-34,26 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^3 \right] = 0,76;$$

$$P_8(8000) = \exp \left[- \sum_{i=1}^8 \lambda_i \cdot l_{\text{ТО-3}} \right] = \exp \left[-45,68 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^3 \right] = 0,69;$$

$$Q_6(8000) = 1 - P_6(l_{\text{ТО-3}}) = 1 - 0,76 = 0,24;$$

$$Q_8(8000) = 1 - P_8(l_{\text{ТО-3}}) = 1 - 0,69 = 0,31.$$

Збільшення кількості КМБ із шести до восьми призводить до зниження імовірності безвідмовної роботи системи на 7 % ($P_6(l_{\text{ТО-3}}) - P_8(l_{\text{ТО-3}}) = 0,76 - 0,69 = 0,07$). При цьому імовірність

відмови збільшується в 1,3 раза ($Q_8(I_{\text{ТО-3}})/Q_6(I_{\text{ТО-3}}) = 0,31/0,24 = 1,3$), тобто в експлуатації буде на 30 % більше відмов.

Таким чином, для забезпечення такого самого рівня безвідмовності, як і в шестиосьової секції, необхідно, щоб один КМБ восьмиосьової секції мав рівень інтенсивності відмов, що дорівнює $4,28 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1}$ ($\lambda'_8 = \lambda_6/8 = 34,26 \cdot 10^{-6}/8 = 4,28 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-1}$), і величину середнього наробітку на відмову $L'_i = 1/\lambda'_8 = 1/4,28 \cdot 10^{-6} = 233,5 \cdot 10^3 \text{ км}$. Тому тільки для збереження уже досягнутого рівня надійності під час виготовлення восьмиосьової секції величина середнього наробітку на відмову одного КМБ має бути збільшена в 1,33 рази ($233,5 \cdot 10^3/175 \cdot 10^3 = 1,33$), що, звісно, пов'язане зі збільшенням витрат на виготовлення КМБ.

Ефективним засобом підвищення надійності складних систем є використання в їхніх конструкціях резервних елементів. У цьому разі вихід з ладу одного елемента не призводить до відмови системи. Система може виконувати свої функції за наявності пошкодження, але з меншою надійністю. Звичайно, передбачити резервування елементів, зображених на рис. 10.2, неможливо. Але передбачити ввімкнення резервних елементів в електричних схемах контролю й керування локомотивом і практично, і економічно цілком виправдано.

Так, наприклад, з огляду на недостатній рівень безвідмовності блока управління випрямно-інверторними перетворювачами (БУВІП) електровозів серії ВЛ80^Р, було прийнято економічно доцільним встановити в одній секції цього локомотива два блоки керування. Таким

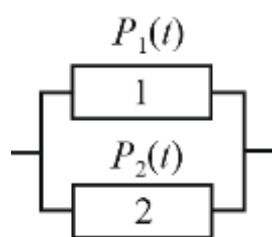


Рис. 10.4. Схема безвідмовності з елементами, що паралельно функціонують

чином, у схемі з'єднання вузлів секції електровоза серії ВЛ80^Р два БУВІП, що дублюють один одного, з погляду забезпечення безвідмовності ввімкнені паралельно. Далі в структурній схемі вони послідовно з'єднуються з двома ВІП і чотирма тяговими електричними двигунами.

Система, що складається з незалежних елементів, пов'язаних функціонально так, що відмова системи відбувається через відмову всіх елементів, зображується структурною схемою з паралельно з'єднаними елементами (подіями), як показано на рис. 10.4. При цьому припускають, що елементи виконують одночасно одну й ту саму функцію: відмови одного або кількох елементів не змінюють

режиму роботи і, отже, показників надійності елементів, що залишилися працездатними.

Наприклад, є два паралельно з'єднаних елементи із заданими значеннями імовірності відмови за наробіток t : $Q_1(t)$ і $Q_2(t)$. Враховуючи незалежність елементів один від одного в сенсі надійності, функція розподілу напрацювання до відмови паралельно з'єднаних елементів визначається добутком

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t), \quad (10.12)$$

а імовірність безвідмовної роботи системи, що розглядається, за той же самий наробіток t

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - Q_1(t) \cdot Q_2(t). \quad (10.13)$$

У загальному випадку, коли система або її ділянка відображається у вигляді n паралельно з'єднаних елементів, вирази (10.12) і (10.13) можна записати у вигляді:

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)]; \quad (10.14)$$

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)], \quad (10.15)$$

де $Q_i(t)$, $P_i(t)$ – імовірність відмови та безвідмовної роботи i -го елемента, відповідно;
 n – кількість елементів.

Якщо елементи в системі однакові, тобто рівнонадійні $Q_1(t) = Q_2(t) = \dots = Q_i(t)$, то

$$Q_c(t) = [Q_i(t)]^n; \quad (10.16)$$

$$P_c(t) = 1 - [Q_i(t)]^n. \quad (10.17)$$

Приклад 10.3. Визначити імовірність безвідмовної роботи системи, що складається з трьох паралельно з'єднаних елементів з імовірністю безвідмовної роботи $P_1(t) = 0,95$; $P_2(t) = 0,9$; $P_3(t) = 0,8$.

Розв'язання. За допомогою виразу (10.15) отримаємо

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - (1 - 0,95) \cdot (1 - 0,9) \cdot (1 - 0,8) = 0,999.$$

Отриманий результат показує, що надійність аналізованої системи вища за надійність найякіснішого елемента у цієї системі. На основі цієї структури застосовуються системи з резервуванням. Тому резервування елементів у системі є методом створення надійних систем із недостатньо надійних елементів. При цьому зовсім не байдуже, яким чином здійснюється резервування.

10.3. Визначення показників безвідмовності резервованих систем

Відповідно до [2], *резервування* – це спосіб забезпечення надійності об'єкта за рахунок використання додаткових засобів та (або) можливостей, надлишкових відносно мінімально необхідних для виконання потрібних функцій. Резервування є універсальним принципом підвищення характеристик безвідмовності функціонування, що знайшов широке застосування як у природі, так і техніці та технології й інших сторонах людського життя.

Резервування, додаткові засоби і (або) можливості застосовують з метою збереження працездатного стану виробу в разі відмови одного або декількох його елементів. У цьому разі відмова настає тільки після відмови основних¹ і всіх резервних² елементів. При цьому можливе резервування на рівні всієї системи в цілому (загальне резервування) або на рівні окремих її елементів (роздільне резервування). На практиці застосовуються способи резервування, наведені на рис. 10.5. Схемні реалізації різних способів резервування показано на рис. 10.6.

¹ Основний елемент – це елемент об'єкта, необхідний для виконання потрібних функцій без використання резерву.

² Резервний елемент – це елемент, призначений для виконання функцій основного елемента в разі його відмови.



Рис. 10.5. Способи резервування

Загальне резервування – резервування, в якому резервується об’єкт в цілому (див. рис. 10.6, а).

Роздільне резервування – резервування, за якого резервуються окремі елементи об’єкту або їхні групи (див. рис. 10.6, б).

Основним параметром резервування є його кратність. *Кратність резерву* – відношення числа резервних елементів виробу до числа резервованих¹ ними основних елементів виробу, виражене нескороченим дробом.

Залежно від кратності резервування підрозділяється на резервування з цілою і дробовою кратністю. Схемні позначення обох видів резервування за постійного ввімкнення резерву однакові. Для їхнього розрізнення на схемі вказується кратність резервування m .

У разі резервування з *цілою кратністю* величина m є цілим числом, у разі резервування з *дробовою кратністю* – дробовим числом, що не скорочується. Наприклад, $m = \frac{4}{2}$ означає наявність резервування з дробовою кратністю, за якого кількість резервних елементів дорівнює

¹ Резервований елемент – основний елемент, на випадок відмови якого в об’єкті передбачені один або декілька резервних елементів.

чотирьом, кількість основних – двом, а загальна кількість елементів – шести. Скорочувати дріб не можна, оскільки якщо $m = \frac{4}{2} = 2$, то це означає, що має місце резервування з цілою кратністю, за якого кількість резервних елементів дорівнює двом, а загальна кількість елементів дорівнює трьом.

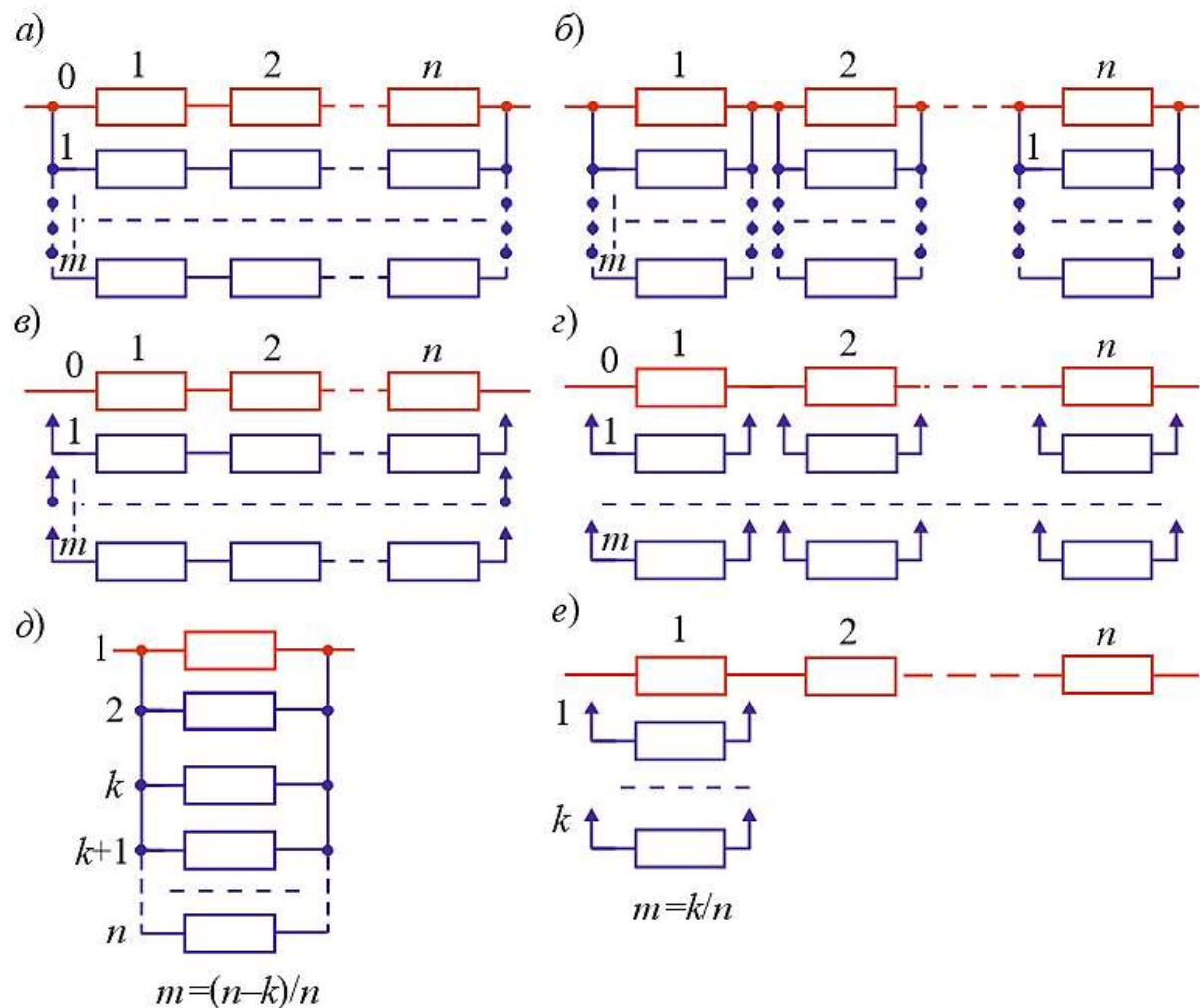


Рис. 10.6. Схемні реалізації різних способів резервування:

а) загальне постійне з цілою кратністю; б) роздільне постійне з цілою кратністю; в) загальне заміщенням з цілою кратністю; г) роздільне заміщенням з цілою кратністю; д) загальне постійне з дрібною кратністю; е) роздільне заміщенням з дрібною кратністю

За способом увімкнення резервування поділяють на постійне і резервування заміщенням. *Постійне резервування* – резервування без перебування структури виробу при виникненні відмови його елемента.

Резервування заміщенням – резервування, за якого функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

Під час увімкнення резерву за способом заміщення резервні елементи до моменту увімкнення в роботу можуть перебувати в трьох станах: навантаженому, полегшеному, ненавантаженому.

У *навантаженому резерві* резерв, що містить один чи декілька резервних елементів, перебуває у режимі основного елемента. *Полегшений резерв* – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у режимі меншого навантаження порівняно з основним елементом. *Ненавантажений резерв* – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у ненавантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента.

Наведемо основні розрахункові формули для зазначених вище видів резервування.

1. Для загального резервування з постійно ввімкненим резервом і цілою кратністю (див. рис. 10.6, а) імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}, \quad (10.18)$$

де $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента протягом наробітку t ;

n – кількість елементів основної системи або будь-якої з резервних систем;

m – кратність резервування (кількість резервних кіл).

За експоненційний закон розподілу, коли $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ показники надійності визначаються за формулами:

$$P_c(t) = 1 - \left[1 - e^{-\lambda_0 t} \right]^{m+1}; \quad (10.19)$$

$$T_{cc} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{co} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}; \quad (10.20)$$

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o(m+1)e^{-\lambda_o t} (1 - e^{-\lambda_o t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda_o t})^{m+1}}, \quad (10.21)$$

де $\lambda_o = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ – інтенсивність відмов основної системи або будь-якої з резервних систем;
 T_{co} – середній наробіток до відмови основної системи або будь-якої з резервних систем.

У разі резервування рівнонадійних виробів

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m Q_i(t) = 1 - \prod_{i=0}^m [1 - P_i(t)], \quad (10.22)$$

де $Q_i(t)$, $P_i(t)$ – імовірність відмов і імовірність безвідмовної роботи i -го елемента протягом часу t відповідно.

2. Для роздільного резервування з постійно ввімкненим резервом і цілою кратністю (рис. 10.6, б) імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - P_i(t)]^{m_i+1} \right\}, \quad (10.23)$$

де $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента протягом наробітку t ;

m_i – кратність резервування i -го елемента;

n – кількість елементів основної системи.

За експоненційного закону розподілу, коли $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - e^{-\lambda_i t}]^{m_i+1} \right\}. \quad (10.24)$$

За рівнонадійних елементів і однакової кратності резервування

$$P_c(t) = \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda t} \right)^{m_i+1} \right]^n; \quad (10.25)$$

$$T_{cc} = \int_0^\infty P_c(t) dt = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i(v_i+1)\dots(v_i+n-1)}; \quad (10.26)$$

$$\lambda_c(t) = \frac{n(m+1)\lambda e^{-\lambda t} \left(1 - e^{-\lambda t} \right)^m}{1 - \left(1 - e^{-\lambda t} \right)^{m+1}}, \quad (10.27)$$

де λ – інтенсивність відмов одного елемента системи;

$$v_i = \frac{i+1}{m+1}.$$

На практиці найчастіше зустрічається паралельне з'єднання двох однакових елементів, яке називається дублюванням¹ або навантаженим резервуванням.

У разі дублювання елементів за умови $\lambda = \text{const}$

$$P_c = 1 - \left(1 - e^{-\lambda t} \right)^2 = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}.$$

Середній наробіток до відмови такої дубльованої системи

$$T_{cc} = \int_0^\infty P_c(t) dt = \int_0^\infty \left[2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \right] dt = 2 \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt - \int_0^\infty e^{-2\lambda t} dt = 2 \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\lambda};$$

$$T_{cc} = 1,5T_c.$$

Таким чином, середній наробіток до відмови систем у разі дублювання елементів у 1,5 рази перевищує середній наробіток до відмови кожного елемента.

3. Для загального резервування заміщенням із цілою кратністю (див. рис. 10.6, в):

¹ Дублювання – це резервування з кратністю резерву один до одного.

– за експоненційного закону розподілу та ненавантаженого стану резерву

$$P_c(t) = e^{-\lambda_o t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_o t)^i}{i!}; \quad (10.28)$$

$$T_{c\ c} = \frac{m+1}{\lambda_o} = (m+1)T_{co}; \quad (10.29)$$

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o (\lambda_o t)^m}{m! \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_o t)^i}{i!}}, \quad (10.30)$$

де λ_o , T_{co} – інтенсивність відмови і середній наробіток до відмови основної (нерезервованої) системи відповідно.

– за експоненційного закону розподілу та полегшеного стану резерву

$$P_c(t) = e^{-\lambda_o t} \left[1 + \sum_{i=0}^m \frac{\alpha_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_o t})^i \right]; \quad (10.31)$$

$$T_{c\ c} = \frac{1}{\lambda_o} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1 + ik}; \quad (10.32)$$

$$\alpha_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_o}{\lambda_1} \right);$$

$$k = \frac{\lambda_1}{\lambda_o},$$

де λ_1 – інтенсивність відмов резервного пристрою до заміщення.

У разі навантаженого резерву формули для визначення $P_c(t)$ та $T_{c\ c}$ збігаються з (10.19) та (10.20) відповідно.

4. Для роздільного резервування заміщенням із цілою кратністю (див. рис. 10.6, з) імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (10.33)$$

де $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи системи через відмови елементів i -го типу, резервованих за способом заміщення. Обчислюється $P_i(t)$ за формулами загального резервування заміщенням (10.28), (10.31).

За рівної надійності всіх елементів

$$P_c(t) = e^{-\lambda_o t} \left[\sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!} \right]^n; \quad (10.34)$$

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o (\lambda t)^m}{m! \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!}}. \quad (10.35)$$

5. Для загального резервування з дробовою кратністю і постійно ввімкненим резервом (див. рис. 10.6, д) імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i [P(t)]^{n-i} \cdot [1 - P(t)]^i, \quad (10.36)$$

де $P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи основної або будь-якої з резервних систем;

n – загальна кількість елементів розрахунку резервованого з'єднання;

k – кількість елементів, необхідне для нормальної роботи;

$(n - k)$ – кількість резервних елементів.

Кратність резервування $m = \frac{n-k}{k}$, $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ – кількість комбінацій із n елементів по i .

За експоненційного закону розподілу показники надійності системи

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i e^{-\lambda(n-i)t} \cdot [1 - e^{-\lambda t}]^i; \quad (10.37)$$

$$T_{c\ c} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^{n-k} \frac{1}{k+i}. \quad (10.38)$$

6. Для роздільного резервування заміщенням із дробовою кратністю (ковзне резервування) (див. рис. 10.6, е) імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = e^{-\lambda_o t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_o t)^i}{i!}. \quad (10.39)$$

Цей вид резервування застосовується, якщо всі елементи системи виконують однакові функції. Основна система має n елементів, а k елементів перебувають у холодному резерві. Кратність резервування $m = \frac{k}{n}$.

Надійність цієї системи дорівнює надійності системи із загальним резервуванням із заміщенням, але водночас має в n разів менше резервних елементів. Однак перемикальні пристрої при цьому ускладнюються.

Імовірність безвідмовної роботи резервованої системи можна обчислити, підсумовуючи імовірності всіх сприятливих гіпотез, тобто

$$P_c(t) = \sum_{j=1}^k p_j(t), \quad (10.40)$$

де $p_j(t)$ – імовірність j -ї сприятливої гіпотези;

k – кількість сприятливих гіпотез.

10.4. Застосування марковських процесів під час розрахунку структурної надійності

10.4.1. Ненавантажене резервування

На відміну від навантаженого резервування (дублювання), за якого основний і резервний елементи працюють одночасно, за ненавантаженого резервування працює тільки основний елемент, а резервний вмикається після його відмови (рис. 10.7).

Припустимо, що основний і резервний елементи рівнонадійні. Імовірність безвідмовної роботи у разі експоненційного розподілу наробітку до відмови

$$P_1(t) = P_2(t) = e^{-\lambda t}, \quad (10.41)$$

де $\lambda = 1/T_c$, T_c – середній наробіток до відмови.

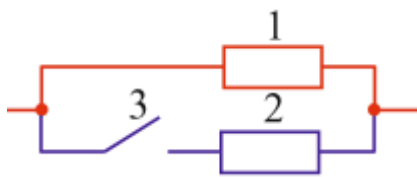


Рис. 10.7. Схема ненавантаженого резервування:

1 – основний елемент; 2 – резервний елемент; 3 – перемикач

Ця система в процесі функціонування може перебувати в трьох станах (рис. 10.8):

- 1 – працює основний елемент, резервний вимкнений;
- 2 – працює резервний елемент, основний відмовив;
- 3 – відмовили обидва елементи.

Імовірність відмови одного елемента за час Δt дорівнює $\lambda \Delta t$. Оскільки розглядається система без відновлення елементів, що відмовили, то після відмови резервного елемента система переходить у 3-й стан, у якому залишається з імовірністю, що дорівнює 1. Такий стан називається тупиковим, або таким, що поглинає.

Рівняння Колмогорова для розглянутої системи записуються у вигляді:

$$\begin{cases} P_1(t + \Delta t) = P_1(t)(1 - \lambda \Delta t); \\ P_2(t + \Delta t) = P_1(t)\lambda \Delta t + P_2(t)(1 - \lambda \Delta t); \\ P_3(t + \Delta t) = P_2(t)\lambda \Delta t + P_3(t) \cdot 1. \end{cases}$$

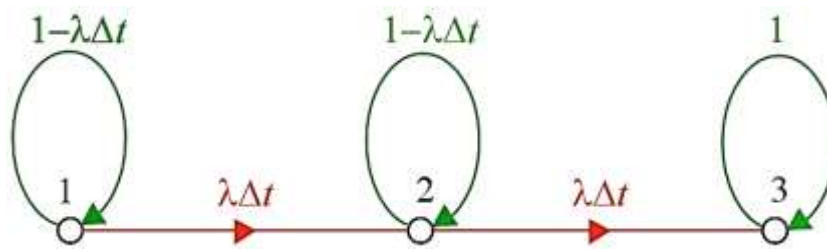


Рис. 10.8. Діаграма станів та переходів¹ системи з ненавантаженим резервуванням

Розкривши дужки, перенісши $P_i(t)$ у i -му рівнянні з правої частини в ліву, розділивши обидві частини рівняння на Δt і перейшовши до межі за $\Delta t \rightarrow 0$, одержуємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} P_1'(t) = -\lambda P_1(t); \\ P_2'(t) = \lambda P_1(t) - \lambda P_2(t); \\ P_3'(t) = \lambda P_2(t). \end{cases}$$

Граф переходів розглянутої системи незв'язний², оскільки, потрапивши в третій стан, система залишається в ньому й не може перейти в жоден інший стан, тому для визначення імовірностей станів необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь.

Задавшись початковими умовами $P_1(0) = 1$; $P_2(0) = P_3(0) = 0$, розв'яжемо систему диференціальних рівнянь операторним методом.

Після перетворення Лапласа система диференціальних рівнянь перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} sP_1(s) - 1 = -\lambda P_1(s); \\ sP_2(s) - 0 = \lambda P_1(s) - \lambda P_2(s); \\ sP_3(s) - 0 = \lambda P_2(s). \end{cases}$$

¹ Діаграма станів та переходів – це схема, що відображає множину можливих станів об'єкта та імовірних однокрокових переходів між ними. Також її називають графом переходів.

² Граф незв'язний означає, що в ньому є хоча б дві вершини, між якими неможливо пройти шляхом через ребра графа.

З першого рівняння знаходимо $P_1(s) = \frac{1}{s + \lambda}$, з другого рівняння –

$$P_2(s) = \frac{\lambda}{(s + \lambda)^2}.$$

За таблицями зворотного перетворення Лапласа знаходимо оригінали, що відповідають зображенням $P_1(s)$ та $P_2(s)$:

$$P_1(t) = e^{-\lambda t}, \quad P_2(t) = \lambda t e^{-\lambda t}.$$

Оскільки система працездатна, перебуваючи в стані 1 або 2, то імовірність її безвідмовної роботи дорівнює $P_c(t) = P_1(t) + P_2(t)$, або

$$P_c(t) = (1 + \lambda t) e^{-\lambda t}. \quad (10.41)$$

Інтегруючи функцію $P_c(t)$ у межах від 0 до ∞ , знаходимо середній наробіток до відмови системи з ненавантаженим резервуванням елементів

$$T_{cc}(t) = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} (1 + \lambda t) e^{-\lambda t} dt.$$

Візьмемо отриманий інтеграл по частинах

$$\begin{aligned} u &= 1 + \lambda t, \quad du = \lambda dt, \\ dv &= e^{-\lambda t} dt, \quad v = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t}, \\ T_{cc} &= (1 + \lambda t) \left(-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \left(-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right) \lambda dt. \end{aligned}$$

Оскільки функція $e^{-\lambda t}$ прагне до 0 швидше, ніж зростає наробіток t , то під час підстановки верхньої межі інтегрування перший доданок обертається на 0, а під час підстановки нижньої межі набуває значення $1/\lambda$. У результаті маємо:

$$T_{cc} = \frac{1}{\lambda} + \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} + \left(-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right) \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\lambda}.$$

Оскільки середній наробіток до відмови елемента $T_c = 1/\lambda$, то $T_{cc} = 2T_c$.

Таким чином, за ненавантаженого резервування середній наробіток до відмови системи в два рази перевищує середній наробіток до відмови елемента, тоді як за навантаженого резервування це співвідношення становить 1,5, тобто ненавантажене резервування забезпечує вищі показники надійності, ніж навантажене.

Однак під час використання ненавантаженого резервування можлива перерва в роботі системи на час вимкнення основного елемента, що відмовив, і ввімкнення резервного елемента. Тому в тих випадках, коли з якихось причин, наприклад за умов забезпечення безпеки, перерва в роботі системи неприпустима, застосовують навантажене резервування.

На електровозах за схемою навантаженого резервування працюють мотор-компресори, а за схемою ненавантаженого резервування – струмоприймачі. Відмова основного струмоприймача виявляється відразу за відсутністю тягового зусилля і не призводить до небезпечної ситуації. Якби мотор-компресори були ввімкнені за схемою ненавантаженого резервування, то відмову основного мотор-компресора можна було б не виявити одразу, що могло б призвести до виснаження гальмівної магістралі завдяки витoku стисненого повітря і створення небезпечної ситуації.

10.4.2. Резервування з відновленням працездатності елементів, що відмовили

Розглянемо функціонування системи, що складається з двох однакових елементів, які працюють у режимі навантаженого резервування. Після відмови одного з елементів негайно починається відновлення його працездатності. Якщо елемент, що відмовив, відновлюється до того, як відмовить другий елемент, то система повертається у вихідний стан. Якщо протягом часу відновлення елемента, що відмовив, відбувається відмова і другого елемента, то система повністю відмовляє, припиняється її функціонування, але при цьому триває відновлення працездатності елемента, що відмовив першим. Після його відновлен-

ня система вступає в роботу, і одночасно починається відновлення другого елемента, після його відновлення система повертається у вихідний стан. Далі процес функціонування відбувається аналогічно.

Припустимо, що час безвідмовної роботи обох елементів і час відновлення їхньої працездатності є випадковими величинами, розподіленими за експонентним законом.

Позначимо:

$P(t) = e^{-\lambda t}$ – імовірність безвідмовної роботи одного елемента;

$\lambda = 1/T_c$ – інтенсивність відмов;

T_c – середній наробіток до відмови;

$V(t) = 1 - e^{-\mu t}$ – імовірність відновлення працездатності елемента,

що відмовив;

$\mu = 1/T_b$ – інтенсивність відновлення;

T_b – середній час відновлення;

$\lambda \Delta t$ – імовірність відмови одного елемента за нескінченно малий проміжок часу Δt ;

$(1 - \lambda \Delta t)$ – імовірність безвідмовної роботи елемента за час Δt ;

$\mu \Delta t$ – імовірність відновлення працездатності одного елемента за час Δt ;

$(1 - \mu \Delta t)$ – імовірність того, що за час Δt працездатність елемента, що відмовив, не буде відновлено.

За зроблених припущень про експоненційний характер розподілів часу безвідмовної роботи і часу відновлення процес функціонування розглянутої системи є марковським.

У процесі функціонування розглянута система може перебувати в таких станах:

- 1-й – обидва елементи працюють;
- 2-й – один елемент працює, другий відмовив і відновлюється;
- 3-й – обидва елементи відмовили, один із них відновлюється, система відмовила.

Якщо система перебуває в 1-му стані, то за час Δt вона перейде у 2-й стан у разі відмови одного з елементів. Якщо жоден з елементів не відмовив, то система залишається в 1-му стані. Імовірність безвідмовної роботи двох елементів дорівнює

$$(1 - \lambda \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) = 1 - 2\lambda \Delta t + \lambda^2 \Delta t^2.$$

Нехтуючи членом вищого порядку малості $\lambda^2 \Delta t^2$, отримуємо, що імовірність того, що система залишатиметься у 1-му стані протягом часу Δt дорівнюватиме

$$P_{11} = 1 - 2\lambda\Delta t.$$

Імовірність відмови одного з двох елементів, тобто

$$P_{12} = 1 - (1 - 2\lambda\Delta t) = 2\lambda\Delta t.$$

Якщо система перебуває у 2-му стані, то:

– вона перейде в 1-й стан, якщо за час Δt відбудеться відновлення елемента, що відмовив, і не відмовить другий елемент

$$P_{21} = \mu\Delta t(1 - \lambda\Delta t) = \mu\Delta t - \lambda\mu\Delta t^2 \cong \mu\Delta t;$$

– вона перейде в 3-й стан, якщо за час Δt не буде відновлений елемент, що відмовив, і відмовить другий елемент

$$P_{23} = (1 - \mu\Delta t)\lambda\Delta t \cong \lambda\Delta t;$$

– вона залишиться у 2-му стані, якщо не перейде ні в 1-й, ні в 3-й стан

$$P_{22} = (1 - \mu\Delta t)(1 - \lambda\Delta t) \cong 1 - (\lambda + \mu)\Delta t.$$

Якщо система перебуває в 3-му стані, то вона перейде у 2-й, якщо за час Δt закінчиться відновлення працездатності елемента, який відмовив першим, $P_{32} = \mu\Delta t$.

Якщо відновлення працездатності елемента, що відмовив, за час Δt не закінчиться, то система залишиться в 3-му стані з імовірністю

$$P_{33} = 1 - \mu\Delta t.$$

Граф переходів розглянутої системи зображено на рис. 10.9.

Рівняння Колмогорова, що зв'язують між собою імовірності станів системи в моменти t і $t + \Delta t$, записуються у вигляді:

$$\begin{cases} P_1(t + \Delta t) = P_1(t)(1 - 2\lambda\Delta t) + P_2(t)\mu\Delta t; \\ P_2(t + \Delta t) = P_1(t)2\lambda\Delta t + P_2(t)(1 - (\lambda + \mu)\Delta t) + P_3(t)\mu\Delta t; \\ P_3(t + \Delta t) = P_2(t)\lambda\Delta t + P_3(t)(1 - \mu\Delta t). \end{cases}$$

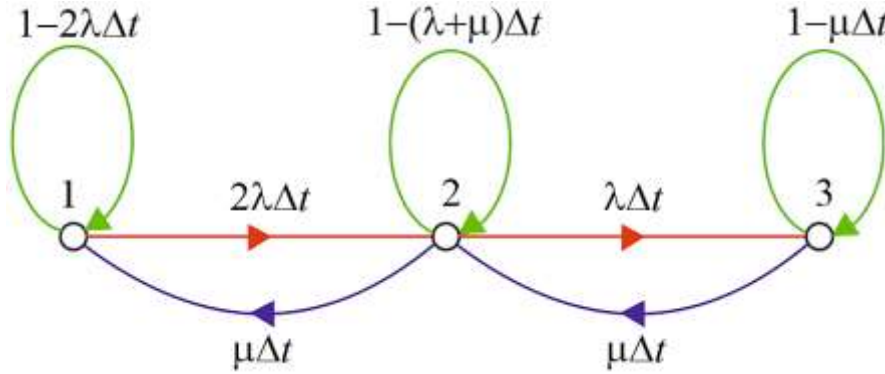


Рис. 10.9. Граф переходів системи з відновленням елементів, що відмовили

Після відповідних перетворень ця система скінченнорізницевих рівнянь перетворюється на систему диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} P_1'(t) = -2\lambda P_1(t) + \mu P_2(t); \\ P_2'(t) = 2\lambda P_1(t) - (\lambda + \mu) P_2(t) + \mu P_3(t); \\ P_3'(t) = \lambda P_2(t) - \mu P_3(t). \end{cases}$$

Граф переходів, показаний на рис. 10.9, є зв'язним, тому процес функціонування розглянутої системи має сталий режим, у якому імовірності всіх станів перестають залежати від часу, набувають фінальних значень, а їхні похідні дорівнюють нулю, за такого стану диференціальні рівняння перетворюються на алгебраїчні

$$\begin{cases} -2\lambda P_1 + \mu P_2 = 0; \\ 2\lambda P_1 - (\lambda + \mu) P_2 + \mu P_3 = 0; \\ \lambda P_2 - \mu P_3 = 0. \end{cases}$$

Отриману систему алгебраїчних рівнянь розв'язуємо за умови:

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1. \quad (10.42)$$

З першого рівняння системи знаходимо

$$P_2 = \frac{2\lambda}{\mu} P_1.$$

З третього рівняння виражаємо

$$P_3 = \frac{\lambda}{\mu} P_2 = \frac{2\lambda^2}{\mu^2} P_1.$$

Отримані вирази P_2 і P_3 підставляємо в (10.42)

$$P_1 + \frac{2\lambda}{\mu} P_1 + \frac{2\lambda^2}{\mu^2} P_1 = 1.$$

Звідки

$$P_1 = \frac{1}{1 + \frac{2\lambda}{\mu} + \frac{2\lambda^2}{\mu^2}}; \quad P_2 = \frac{\frac{2\lambda}{\mu}}{1 + \frac{2\lambda}{\mu} + \frac{2\lambda^2}{\mu^2}}.$$

Розглянута система перебуває в працездатному стані і виконує свої функції, перебуваючи у станах 1 або 2, тому коефіцієнт готовності цієї системи $K_r = P_1 + P_2$, тобто

$$K_r = \frac{1 + \frac{2\lambda}{\mu}}{1 + \frac{2\lambda}{\mu} + \frac{2\lambda^2}{\mu^2}}. \quad (10.43)$$

Розрахуємо значення K_r за $\lambda = 0,01 \text{ год}^{-1}$ і $\mu = 0,1 \text{ год}^{-1}$, тобто кожен елемент відмовляє в середньому один раз за 100 год роботи, а середній час відновлення становить 10 год.

Розрахунок коефіцієнта готовності для нерезервованої системи дає значення

$$K_r = \frac{1 + \frac{2 \cdot 0,01}{0,1}}{1 + \frac{2 \cdot 0,01}{0,1} + 2 \left(\frac{0,01}{0,1} \right)^2} = \frac{1,2}{1,22} = 0,98.$$

Таким чином, введення резервування істотно підвищило надійність системи, наблизивши імовірність її перебування в працездатному стані до 1, тобто резервування елементів із відновленням працездатності після відмови є ефективним способом підвищення надійності технічних об'єктів.

10.5. Застосування логіко-імовірнісних методів розрахунку надійності систем

Розглянемо систему, що складається з двох паралельно включених елементів (рис. 10.10). Імовірність безвідмовної роботи першого елемента позначимо P_1 , другого – P_2 (тут для скорочення запису опущено символи аргументу часу t).

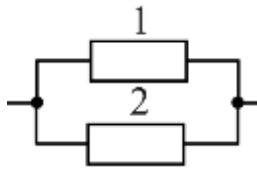


Рис. 10.10. Паралельне з'єднання двох елементів

Працездатність усієї системи забезпечують такі поєднання станів елементів:

– 1-й стан – перший елемент працює, а другий відмовив. Імовірність цього поєднання дорівнює $P_1(1 - P_2)$;

– 2-й стан – перший елемент відмовив, а другий працює. Імовірність цього поєднання $(1 - P_1)P_2$;

– 3-й стан – обидва елементи працюють. Імовірність цього поєднання дорівнює P_1P_2 .

Імовірність безвідмовної роботи системи дорівнює сумі імовірностей тих поєднань станів елементів, за яких забезпечується працездатний стан системи

$$P_c = P_1(1 - P_2) + (1 - P_1)P_2 + P_1P_2 = P_1 + P_2 - P_1P_2.$$

Розрахунок за формулою (10.13) дає такий самий вираз імовірності безвідмовної роботи системи

$$P_c = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = P_1 + P_2 - P_1P_2.$$

Таким чином, для розрахунку імовірності безвідмовної роботи (далі для стислості – надійності) складної системи достатньо розглянути всі можливі поєднання станів елементів системи, вибрати ті поєднання, що забезпечують працездатний стан системи, записати імовірності кожного з цих поєднань у вигляді добутку імовірностей станів усіх елементів у цьому поєднанні, причому імовірність працездатного стану елемента дорівнює імовірності його безвідмовної роботи P_i , а імовірність непрацездатного стану – імовірності відключення від роботи $(1 - P_i)$, імовірність відмов. Отриманий добуток називається елементарним. Для запису виразу імовірності безвідмовної роботи системи складаються всі елементарні добутки.

Щоб уникнути помилок за великої кількості елементів і складної структури системи, описану процедуру формулюють за допомогою математичного апарату алгебри логіки – булевої алгебри.

У булевій алгебрі змінні x приймають два значення: 1 або 0.

Під час аналізу надійності системи кожному її елементу ставиться у відповідність змінна X_i , значення якої визначається станом елемента

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо елемент працездатний;} \\ 0, & \text{якщо елемент відмовив.} \end{cases}$$

Стан системи описується змінною y , причому

$$y = \begin{cases} 1, & \text{якщо система працездатна;} \\ 0, & \text{якщо система відмовила.} \end{cases}$$

Якщо система складається з n елементів, то загальна кількість різних поєднань станів елементів (наборів значень змінних X_i) дорівнює 2^n . Перебір усіх наборів значень змінних X_i здійснюється шляхом побудови таблиці станів, яка для системи, показаної на рис. 10.10, має вигляд табл. 10.1.

Оскільки в системі, що розглядається, кількість елементів $n = 2$, то кількість різних наборів значень змінних X_i дорівнює $2^2 = 4$.

Таблиця станів для системи з двох елементів з'єднаних паралельно

№ набору	Значення змінних		
	x_1	x_2	y
0	0	0	0
1	0	1	1
2	1	0	1
3	1	1	1

Перебір усіх наборів починають із набору з номером 0, у якому всі змінні x_i приймають нульові значення.

Отримане поєднання значень змінних x_i (у розглянутому прикладі 00) інтерпретують як число, записане в двійковій системі. Перехід до наступного набору здійснюється додаванням 1 до цього числа: $00 + 1 = 01$. Додавання ведеться за правилами двійкової системи, де $0 + 0 = 0$, $0 + 1 = 1$, $1 + 0 = 1$, $1 + 1 = 10$, тобто 0 записується в молодший розряд суми, а 1 додається до вмісту старшого розряду. Таким чином, набору з номером 1 відповідає двійкове число 01.

Для переходу до наступного – другого набору до числа 01 додають 1, при цьому одиниця плюсується в молодший розряд, де записано значення 1. Оскільки $1 + 1 = 10$, то в молодшому розряді записується 0, а 1 плюсується до вмісту старшого розряду, де записано 0. Оскільки $0 + 1 = 1$, то в результаті додавання отримуємо число 10. Останній, третій набір змінних отримуємо додаванням чисел $10 + 1 = 11$.

Перебираючи всі набори змінних x_i , визначаємо значення змінної y , що відповідає кожному з них. У розглянутому прикладі 0-му набору відповідає $y = 0$, а наборам 1, 2 і 3 – $y = 1$.

Для кожного набору, на якому $y = 1$, записують елементарні добутки імовірностей станів елементів, причому якщо x_i входить до набору як 1, то в елементарному добутку записується імовірність безвідмовної роботи цього елемента P_i , а якщо значення змінної $x_i = 0$, то в елементарний добуток входить імовірність відмови елемента $(1 - P_i)$.

Для отримання імовірності безвідмовної роботи системи складають елементарні добутки імовірностей станів елементів.

У розглянутому прикладі вихідна змінна $y = 1$ на наборах 1, 2 і 3, яким відповідають елементарні добутки $(1 - P_1)P_2$, $P_1(1 - P_2)$, P_1P_2 .

Імовірність безвідмовної роботи системи дорівнює

$$P_c = P_1(1 - P_2) + (1 - P_1)P_2 + P_1P_2 = P_1 + P_2 - P_1P_2.$$

Отриманий вираз у точності відповідає розрахованим за формулою (10.15).

Незважаючи на деяку громіздкість, логіко-імовірнісні методи виявляються єдиною можливими під час розрахунку надійності систем, структуру яких не можна представити у вигляді поєднання груп послідовно і паралельно з'єднаних елементів.

Приклад 10.4. Розрахувати надійність (імовірність безвідмовної роботи) системи, показаної на рис. 10.11, у якій елементи з'єднано за мостовою схемою.

Розв'язання. Мостову схему не можна представити у вигляді груп послідовно і паралельно включених елементів, тому використовуємо логіко-імовірнісні методи.

Таблиця станів для системи, представленої на рис. 10.11, наведено в табл. 10.2.

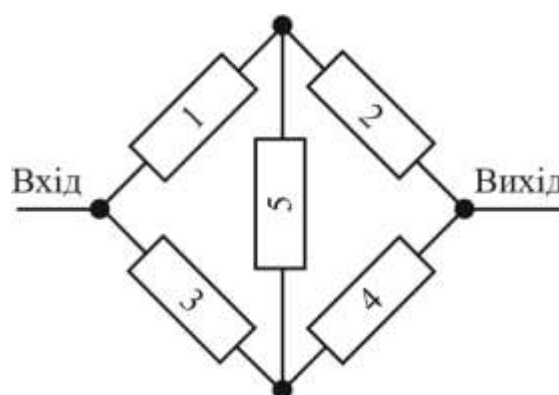


Рис. 10.11. З'єднання елементів за мостовою схемою

Таблиця 10.2

Таблиця станів для системи з елементів з'єднаних за мостовою схемою

№ набору	Значення змінних					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	1	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	0	1	0	1	0
6	0	0	1	1	0	1

Закінчення табл. 10.2

1	2	3	4	5	6	7
7	0	0	1	1	1	1
8	0	1	0	0	0	0
9	0	1	0	0	1	0
10	0	1	0	1	0	0
11	0	1	0	1	1	0
12	0	1	1	0	0	0
13	0	1	1	0	1	1
14	0	1	1	1	0	1
15	0	1	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0	0
17	1	0	0	0	1	0
18	1	0	0	1	0	0
19	1	0	0	1	1	1
20	1	0	1	0	0	0
21	1	0	1	0	1	0
22	1	0	1	1	0	1
23	1	0	1	1	1	1
24	1	1	0	0	0	1
25	1	1	0	0	1	1
26	1	1	0	1	0	1
27	1	1	0	1	1	1
28	1	1	1	0	0	1
29	1	1	1	0	1	1
30	1	1	1	1	0	1
31	1	1	1	1	1	1

Обираючи набори, на яких вихідна змінна $y = 1$, записуючи елементарні добутки імовірностей станів імовірностей елементів і складаючи їх, отримуємо імовірність безвідмовної роботи системи

$$\begin{aligned}
 P_c = & (1 - P_1)(1 - P_2)P_3P_4(1 - P_5) + (1 - P_1)(1 - P_2)P_3P_4P_5 + \\
 & + (1 - P_1)P_2P_3(1 - P_4)P_5 + (1 - P_1)P_2P_3P_4(1 - P_5) + \\
 & + (1 - P_1)P_2P_3P_4P_5 + P_1(1 - P_2)(1 - P_3)P_4P_5 +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +P_1(1-P_2)P_3P_4(1-P_5)+P_1(1-P_2)P_3P_4P_5+ \\
& +P_1P_2(1-P_3)(1-P_4)(1-P_5)+P_1P_2(1-P_3)(1-P_4)P_5+ \\
& +P_1P_2(1-P_3)P_4(1-P_5)+P_1P_2(1-P_3)P_4P_5+ \\
& +P_1P_2P_3(1-P_4)(1-P_5)+P_1P_2P_3(1-P_4)P_5+ \\
& +P_1P_2P_3P_4(1-P_5)+P_1P_2P_3P_4P_5.
\end{aligned}$$

Отриманий вираз можна спростити, розкривши дужки, але в цьому немає необхідності, оскільки логіко-вірогідні методи розрахунку надійності систем досить легко реалізуються на ЕОМ.

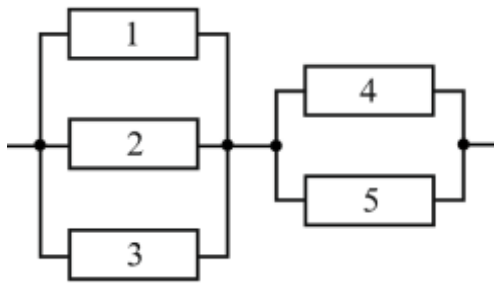


Рис. 10.12. Структурна схема змішаного з'єднання елементів

Методи розрахунку надійності систем проілюструємо прикладами розв'язання відповідних задач.

Приклад 10.5. Визначити імовірність безвідмовної роботи системи, зображеної на рис. 10.12, якщо елементи 1, 2 і 3 відмовляють з інтенсивністю λ_1 , а елементи 4 і 5 з інтенсивністю λ_2 . *Розв'язання.* Рівнонадійні елементи 1, 2 і 3 з'єднані паралельно. Імовірність відмови підсистеми 1-2-3 ви-

значається за формулою:

$$Q_{123}(t) = \left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right)^3.$$

Імовірність безвідмовної роботи P_{123} дорівнює

$$\begin{aligned}
P_{123}(t) &= 1 - Q_{123}(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right)^3 = \\
&= 1 - 1 + 3e^{-\lambda_1 t} - 3e^{-2\lambda_1 t} + e^{-3\lambda_1 t} = 3e^{-\lambda_1 t} - 3e^{-2\lambda_1 t} + e^{-3\lambda_1 t}.
\end{aligned}$$

Рівнонадійні елементи 4 і 5 також з'єднані паралельно. Імовірність безвідмовної роботи підсистеми 4-5 визначається за формулою:

$$P_{45}(t) = 2e^{-\lambda_2 t} - e^{-2\lambda_2 t}.$$

Підсистеми 1-2-3 і 4-5 з'єднані послідовно, тому імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = P_{123}(t)P_{45}(t),$$

отже:

$$\begin{aligned} P_c(t) &= (3e^{-\lambda_1 t} - 3e^{-2\lambda_1 t} + e^{-3\lambda_1 t})(2e^{-\lambda_2 t} - e^{-2\lambda_2 t}) = \\ &= 6e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} - 3e^{-(\lambda_1 + 2\lambda_2)t} - 6e^{-(2\lambda_1 + \lambda_2)t} + \\ &\quad + 3e^{-2(\lambda_1 + \lambda_2)t} + 2e^{-(3\lambda_1 + \lambda_2)t} - e^{-(3\lambda_1 + 2\lambda_2)t}. \end{aligned}$$

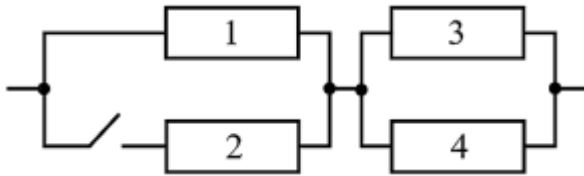


Рис. 10.13. Структурна схема з'єднання елементів при навантаженому і ненавантаженому резервуванні

Приклад 10.6. Визначити імовірність безвідмовної роботи системи, зображеної на рис. 10.13. Усі елементи цієї системи рівнонадійні, інтенсивність їхніх відмов дорівнює λ .

Розв'язання. Елементи 1 і 2 з'єднані за схемою ненавантаженого резервування. Імовірність безвідмовної роботи підсистеми 1-2 визначається за формулою:

$$P_{12}(t) = (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}.$$

Елементи 3 і 4 з'єднані за схемою навантаженого резервування. Імовірність безвідмовної роботи підсистеми 3-4 визначається за формулою:

$$P_{34}(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}.$$

Підсистеми 1-2 і 3-4 з'єднані послідовно, тому імовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = P_{12}(t)P_{34}(t),$$

$$P_c(t) = (1 + \lambda t)e^{-\lambda t} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) = 2e^{-2\lambda t} - e^{-2\lambda t} + 2\lambda te^{-2\lambda t} - \lambda te^{-3\lambda t}.$$

Приклад 10.7. Визначити імовірність безвідмовної роботи восьми-вісного електровоза, що працює зі 100 %-вим використанням сили тяги. Імовірність безвідмовної роботи одного тягового двигуна дорівнює 0,91.

Розв'язання. Відмова електровоза за 100 %-го використання сили тяги настає в разі відмови одного з восьми тягових двигунів, тобто в ситуація, що розглядається, всі двигуни з погляду надійності з'єднані послідовно. Імовірність безвідмовної роботи електровоза визначається за формулою:

$$P_e = \prod_{i=1}^8 P_i = P_i^8 = 0,91^8 = 0,47,$$

тобто імовірність безвідмовної роботи електровоза приблизно в два рази нижча за імовірність безвідмовної роботи одного тягового двигуна.

Приклад 10.8. Восьмивісний електровоз працює з недовикористанням сили тяги, і його відмова настає після відмови чотирьох тягових двигунів (тобто система тягових двигунів має так звану функціональну надмірність). Розрахувати імовірність відмови електровоза, якщо наробіток на відмову кожного тягового двигуна розподілено за експоненційним законом з інтенсивністю $\lambda = 0,001 \text{ год}^{-1}$.

Розв'язання. Розв'язання цього завдання здійснюється на основі методів теорії марковських процесів.

Стан електровоза будемо розрізняти за кількістю відмовлених тягових двигунів. Стани:

- 0 – усі двигуни працюють;
- 1 – відмовив перший тяговий двигун;
- 2 – відмовили два тягових двигуни;
- 3 – відмовили три тягових двигуни;
- 4 – відмовили чотири тягових двигуни.

Імовірність відмови одного тягового двигуна за час Δt відповідно до відповідно до (8.18) визначається як $\lambda \Delta t$. Імовірність безвідмовної роботи двигуна за час Δt дорівнює $(1 - \lambda \Delta t)$.

Імовірність безвідмовної роботи k тягових двигунів за час Δt становить $(1 - \lambda \Delta t)^k \approx 1 - k\lambda \Delta t$.

Імовірність відмови одного з k тягових двигунів за час Δt дорівнює $k\lambda\Delta t$.

Граф переходів електровоза з одного стану в інший наведено на рис. 10.14.

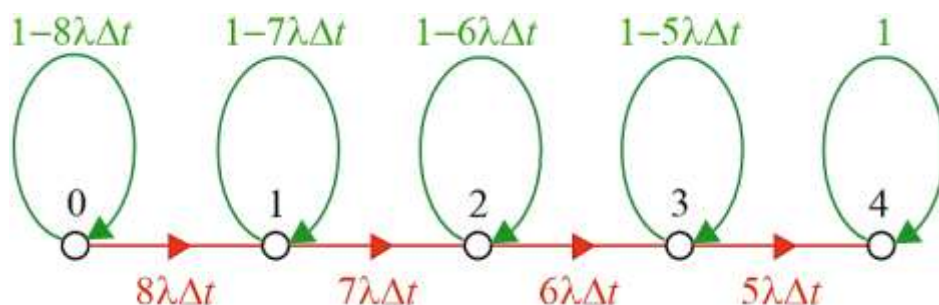


Рис. 10.14. Граф переходів електровоза

Рівняння Колмогорова розглянутої системи мають такий вигляд:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - 8\lambda\Delta t);$$

$$P_1(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot 8\lambda\Delta t + P_1(t)(1 - 7\lambda\Delta t);$$

$$P_2(t + \Delta t) = P_1(t) \cdot 7\lambda\Delta t + P_2(t)(1 - 6\lambda\Delta t);$$

$$P_3(t + \Delta t) = P_2(t) \cdot 6\lambda\Delta t + P_3(t)(1 - 5\lambda\Delta t);$$

$$P_4(t + \Delta t) = P_3(t) \cdot 5\lambda\Delta t + P_4(t) \cdot 1.$$

Після відповідних перетворень система скінченно-різницевого рівнянь перетворюється на систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -8\lambda P_0(t); \\ P_1'(t) = 8\lambda P_0(t) - 7\lambda P_1(t); \\ P_2'(t) = 7\lambda P_1(t) - 6\lambda P_2(t); \\ P_3'(t) = 6\lambda P_2(t) - 5\lambda P_3(t); \\ P_4'(t) = 5\lambda P_3(t). \end{cases}$$

Чисельний розв'язок системи диференціальних рівнянь за початкових умов $P_0(0)=1$, $P_1(0)=P_2(0)=P_3(0)=P_4(0)=0$ і значенні $\lambda = 0,001 \text{ год}^{-1}$ здійснювалося на ЕОМ.

Результати розв'язання у вигляді залежностей імовірностей станів від часу наведено на рис. 10.15. Із цього графіка видно, що за напрацювання 400 год імовірність відмови електровоза становить приблизно 0,3, а за 2000 год – 1.

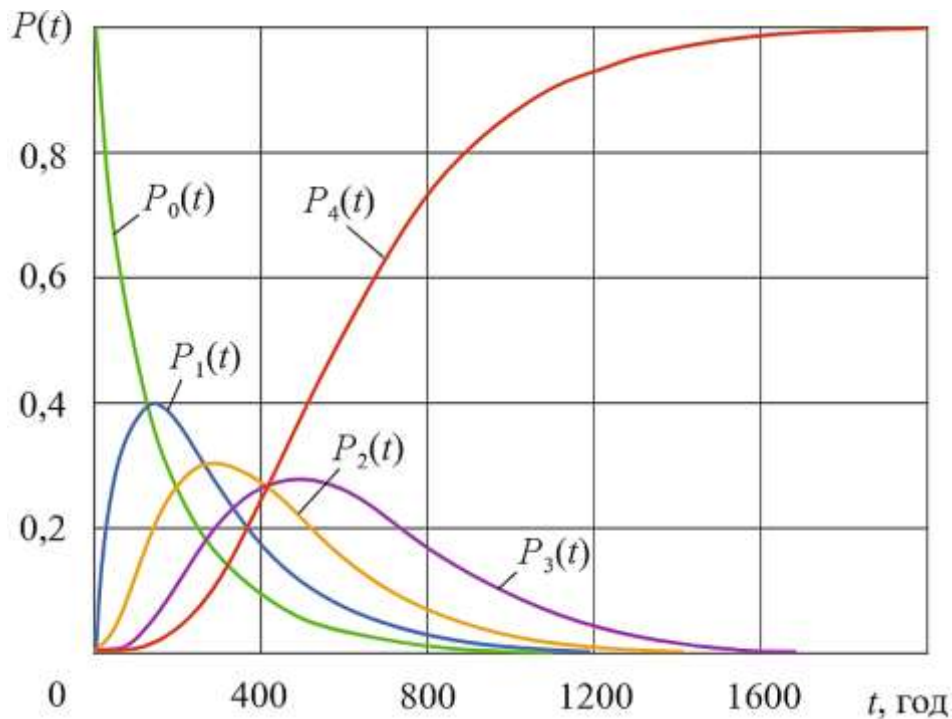


Рис. 10.15. Залежності імовірностей стану електровоза від часу

Приклад 10.9. Інтенсивність відмов тягового двигуна зростає на 25 % від початкового рівня після відмови чергового двигуна. Необхідно визначити імовірність відмови восьмивісного електровоза, якщо вона настає після відмови 4-х тягових двигунів. Наробіток на відмову кожного тягового двигуна розподілений за експоненціальним законом із початковим рівнем інтенсивності відмов $\lambda = 0,001 \text{ год}^{-1}$.

Розв'язання. Це завдання розв'язується аналогічно попередньому. Стани електровоза ті самі.

Інтенсивність відмов тягового двигуна в 0-му стані дорівнює λ , у 1-му – $1,25\lambda$, у 2-му – $1,5\lambda$ і в 3-му – $1,75\lambda$.

Граф переходів електровоза з одного стану в інший показано на рис. 10.16.

Рівняння Колмогорова записуються в такому вигляді:

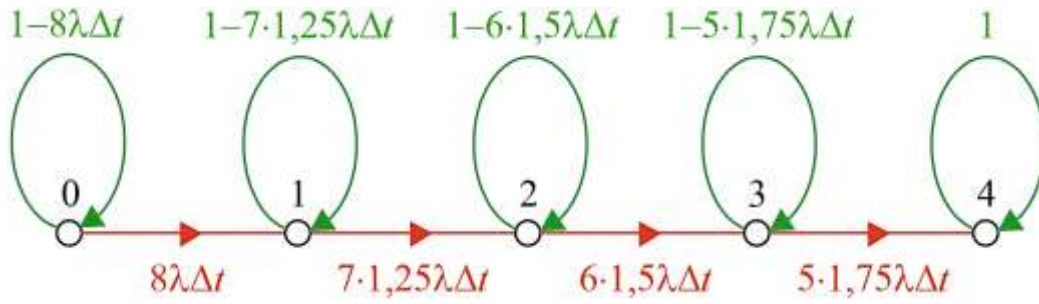


Рис. 10.16. Граф переходів електровоза

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - 8\lambda\Delta t);$$

$$P_1(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot 8\lambda\Delta t + P_1(t)(1 - 7 \cdot 1,25\lambda\Delta t);$$

$$P_2(t + \Delta t) = P_1(t) \cdot 7 \cdot 1,25\lambda\Delta t + P_2(t)(1 - 6 \cdot 1,5\lambda\Delta t);$$

$$P_3(t + \Delta t) = P_2(t) \cdot 6 \cdot 1,5\lambda\Delta t + P_3(t)(1 - 5 \cdot 1,75\lambda\Delta t);$$

$$P_4(t + \Delta t) = P_3(t) \cdot 5 \cdot 1,75\lambda\Delta t + P_4(t) \cdot 1.$$

Виконавши необхідні перетворення, отримаємо систему диференціальних рівнянь при значенні $\lambda = 0,001 \text{ год}^{-1}$:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -0,008P_0(t); \\ P_1'(t) = 0,008P_0(t) - 0,00875P_1(t); \\ P_2'(t) = 0,00875P_1(t) - 0,009\lambda P_2(t); \\ P_3'(t) = 0,009P_2(t) - 0,00875P_3(t); \\ P_4'(t) = 0,00875P_3(t). \end{cases}$$

Чисельний розв'язок цієї системи диференціальних рівнянь за початкових умов $P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0$ також зручно проводити на ЕОМ. Результати розв'язання наведено на рис. 10.17.

З рис. 10.17 видно, що за напрацювання $t = 400 \text{ год}$ імовірність відмови електровоза перевищує 0,4, тобто зросла більш ніж у 1,5 рази порівняно з раніше розглянутим випадком. Електровоз відмовляє з імовірністю 1,0 при наробітку близько 1500 год.

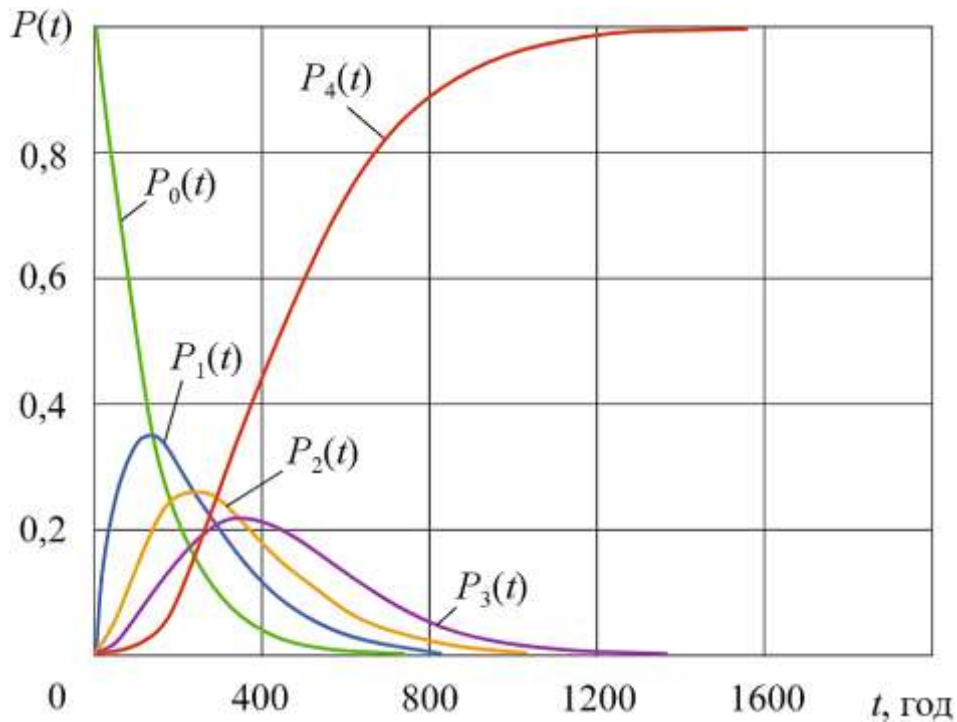


Рис. 10.17. Залежності імовірностей стану електровоза від часу

Таким чином, зростання інтенсивності відмов тягових двигунів, яке відбувається внаслідок збільшення їх навантажень, що залишилися після відмови деяких із них, призводить до істотного зниження надійності електровоза.

Запитання до самоконтролю

1. Що таке елемент і система в контексті структурної надійності рухомого складу?
2. Чому важливо враховувати складність устрою рухомого складу під час оцінки його надійності?
3. Наведіть приклад, коли один і той самий об'єкт розглядається як елемент і як система?
4. Як визначається відмова складної системи?
5. Чому одиниця рухомого складу вважається складною системою?
6. У яких випадках можна розглядати технічні системи як прості системи під час аналізу надійності?
7. Що таке структурна схема надійності?
8. Чим відрізняється послідовне і паралельне з'єднання елементів у теорії надійності від відповідних понять в електротехніці?
9. Як змінюється структурна схема безвідмовності для двох діодів у режимах «коротке замикання» і «обрив кола»?

10. Яка особливість структурної схеми енергетичного кола секції тепловоза?
11. Що таке попередній розрахунок показників структурної надійності і коли його застосовують?
12. Які припущення лежать в основі орієнтовного розрахунку показників надійності?
13. У чому полягає основна різниця між орієнтовним і остаточним розрахунками надійності?
14. Які фактори впливають на інтенсивність відмов елементів у реальних умовах експлуатації?
15. Як визначається інтенсивність відмов елемента під час експлуатації в реальних умовах?
16. Що таке номінальна інтенсивність відмов?
17. Для чого використовуються поправочні коефіцієнти інтенсивності відмов?
18. У чому полягає суть методу структурних схем?
19. Як визначається імовірність безвідмовної роботи системи з послідовним з'єднанням елементів?
20. Чому надійність системи з послідовним з'єднанням елементів завжди менша за надійність окремого елемента?
21. Які припущення приймаються, якщо час роботи до відмови елементів підпорядковується експоненційному закону?
22. Як змінюються імовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов при збільшенні кількості послідовно з'єднаних елементів?
23. Чому при переході до восьмивісних секцій тепловозів зростають вимоги до безвідмовності колісно-моторних блоків?
24. Як обчислюються показники безвідмовності для шести- та восьмивісних секцій тепловозів?
25. Яким чином можна підвищити надійність складних систем?
26. Що означає паралельне з'єднання елементів у структурній схемі з точки зору забезпечення безвідмовності?
27. Як визначається функція розподілу напрацювання до відмови для паралельно з'єднаних елементів?
28. Як змінюється імовірність безвідмовної роботи системи з паралельним з'єднанням елементів?
29. Які переваги дає використання рівнонадійних елементів у паралельних з'єднаннях?
30. Що показує приклад з трьома паралельно з'єднаними елементами з різною імовірністю безвідмовної роботи?

31. Чому резервування є ефективним методом створення надійних систем?
32. Від чого залежить ефективність резервування елементів у системі?
33. Що таке резервування відповідно до ДСТУ 2860-94?
34. Яка мета використання резервування у технічних системах?
35. У чому полягає різниця між загальним і роздільним резервуванням?
36. Що таке кратність резервування і як вона визначається?
37. Чим відрізняється резервування з цілою кратністю від резервування з дробовою кратністю?
38. Які способи увімкнення резервування існують?
39. Що таке постійне резервування?
40. Що таке резервування заміщенням?
41. Які стани резерву розглядаються у разі резервування заміщенням?
42. Як визначається імовірність безвідмовної роботи системи за загального постійного резервування?
43. Як змінюється середній наробіток до відмови системи за постійного резервування?
44. Що таке дублювання і як воно впливає на середній наробіток до відмови системи?
45. Як визначається імовірність безвідмовної роботи системи за загального резервування заміщенням?
46. Як полегшений резерв відрізняється від навантаженого резерву?
47. У чому суть роздільного резервування заміщенням?
48. Що таке ковзне резервування?
49. Як обчислюється імовірність безвідмовної роботи резервованої системи з дробовою кратністю?
50. Чому ковзне резервування ускладнює перемикальні пристрої?
51. У чому полягає відмінність між навантаженим і ненавантаженим резервуванням?
52. Які стани може мати система з ненавантаженим резервуванням?
53. Чому стан, у якому відмовили обидва елементи, називають тупиковим?
54. Що таке граф переходів у контексті моделювання надійності системи?
55. Які рівняння описують зміну імовірностей станів системи з ненавантаженим резервуванням?
56. Які початкові умови задаються для розв'язання рівнянь Колмогорова?

57. Як виглядає вираз для імовірності безвідмовної роботи системи з ненавантаженим резервуванням?
58. На скільки збільшується середній наробіток до відмови за ненавантаженого резервування?
59. Чому ненавантажене резервування забезпечує вищі показники надійності, ніж навантажене?
60. У яких випадках використання ненавантаженого резервування недоцільне?
61. Наведіть приклади застосування навантаженого і ненавантаженого резервування в електровозах.
62. У чому полягає суть резервування з відновленням працездатності елементів?
63. Які стани має система з відновленням працездатності елементів?
64. Що таке коефіцієнт готовності системи?
65. Як будується граф переходів для системи з відновленням елементів?
66. Які рівняння описують зміну імовірностей станів для системи з відновленням?
67. Що відбувається з системою в сталому режимі функціонування?
68. Як обчислюється коефіцієнт готовності для системи з резервуванням і відновленням?
69. Як змінюється надійність системи після введення резервування та відновлення?
70. У чому полягає суть логіко-імовірнісних методів розрахунку надійності систем?
71. Як визначити працездатний стан системи за допомогою таблиці станів?
72. Які значення приймають змінні булевої алгебри у логіко-імовірнісних методах?
73. Як побудувати таблицю станів для системи з n елементами?
74. Що таке елементарний добуток у логіко-імовірнісному методі розрахунку надійності?
75. Як визначити імовірність безвідмовної роботи системи на основі таблиці станів?
76. Чому логіко-імовірнісні методи є важливими для складних систем?
77. Як обчислюється надійність системи з мостовою схемою?
78. Чому мостову схему не можна подати у вигляді простої послідовної або паралельної структури?

79. Як обчислюється імовірність безвідмовної роботи для змішаного з'єднання елементів?
80. Як обчислюється імовірність безвідмовної роботи системи за навантаженого і ненавантаженого резервування?
81. Як розраховується імовірність безвідмовної роботи восьмивісного електровоза за 100%-го використання тяги?
82. Що змінюється в розрахунках надійності електровоза за умов функціональної надмірності?
83. Які стани розглядаються в моделі електровоза з функціональною надмірністю?
84. Як виглядає граф переходів для електровоза за функціональної надмірності?
85. Як скласти рівняння Колмогорова для електровоза з функціональною надмірністю?

Визначення показників надійності за результатами випробувань

Надійність рухомого складу є властивістю, що найбільш повно проявляється в реальних умовах експлуатації та випробувань. Саме в процесі тривалої роботи під дією змінних навантажень, кліматичних факторів, режимів керування та людського чинника формуються фактичні показники безвідмовності, довговічності й ремонтпридатності технічних об'єктів. У зв'язку з цим експлуатаційні дані є одним із найважливіших джерел інформації для кількісного оцінювання надійності рухомого складу та його систем.

На відміну від розрахункових методів, що застосовуються на етапі проєктування, експлуатаційне оцінювання надійності ґрунтується на статистичному аналізі відмов і несправностей, зафіксованих у процесі функціонування реальних об'єктів. Такий підхід дає змогу не лише встановити фактичний рівень надійності, а й виявити конструктивні та експлуатаційні слабкі місця, уточнити припущення щодо законів розподілу часу до відмови та обґрунтувати напрями підвищення експлуатаційної надійності.

Під експериментальним оцінюванням надійності розуміють визначення та контроль показників надійності за результатами випробувань або спостережень, що проводяться в процесі експлуатації. Відповідно, джерелами інформації про технічний стан рухомого складу можуть бути як результати різних видів випробувань (стендових, ударних, ходових), так і дані його фактичної експлуатації.

Для рухомого складу залізниць переважним способом одержання інформації про надійність є експлуатаційні спостереження, оскільки спеціальні стендові випробування на надійність для складних технічних систем, як правило, не проводяться або є економічно й організаційно недоцільними. У таких умовах значна частина інформації про надійність формується в процесі так званої підконтрольної експлуатації.

Експериментальні оцінки показників надійності можуть бути отримані за результатами спеціально організованих або суміщених випробу-

вань, а також за результатами спостережень за функціонуванням виробів у реальних умовах експлуатації. Спеціальними називаються випробування, що організовуються з метою цілеспрямованого визначення або контролю показників надійності. Суміщеними називаються випробування, під час яких визначення показників надійності поєднується з експериментальним дослідженням інших параметрів виробу.

Особливістю експлуатаційних спостережень є те, що вони, як правило, проводяться в умовах неповної та цензурованої інформації. Це зумовлено тим, що не всі об'єкти встигають відмовити за встановлений період спостережень, умови їх роботи можуть істотно відрізнятися, а моменти виникнення відмов не завжди фіксуються з необхідною точністю. У зв'язку з цим виникає потреба у виборі спеціальних планів випробувань (спостережень) та застосуванні адекватних методів статистичної обробки експериментальних даних.

Експериментальні оцінки надійності можуть проводитися з двома основними цілями: визначення фактичних значень показників надійності або контролю відповідності виробу заданим вимогам щодо надійності. Відповідно до поставленої мети розрізняють визначальну та контрольну постановки задачі оцінювання надійності, які мають принципово різні методичні підходи та вимоги до планування випробувань.

Суттєві відмінності між визначальною і контрольною постановками проявляються насамперед на етапі планування. Для контрольної процедури обсяг випробувань і вирішальне правило визначаються на основі заданого нормативного рівня показника надійності, при цьому помилки планування безпосередньо впливають на достовірність висновку щодо відповідності виробу вимогам. У разі визначальної постановки задачі необхідний обсяг випробувань не може бути однозначно встановлений заздалегідь, оскільки він залежить від фактичного рівня надійності виробу, який до початку випробувань є невідомим.

У цьому підручнику розглядається визначальна постановка задачі оцінювання надійності. Під оцінюванням показників надійності при цьому розуміють отримання їх точкових та/або інтервальних оцінок, зокрема визначення меж довірчих інтервалів, які з заданою довірчою імовірністю містять істинні значення відповідних показників.

Точність і достовірність експериментальних оцінок є визначальними чинниками ефективності заходів із забезпечення надійності на всіх етапах життєвого циклу рухомого складу – від проєктування і виготовлення до експлуатації.

Під оцінками показників надійності в цьому випадку розуміють точкові та/або інтервальні оцінки, зокрема межі довірчого інтервалу, які з заданою довірчою імовірністю містять істинне значення показника.

Точкова оцінка показника надійності – це одне конкретне числове значення, отримане за результатами спостережень (наприклад, середній наробіток до відмови). Разом із тим точкові оцінки не дають можливості судити про точність і достовірність отриманих результатів, тобто про ступінь їх відхилення від істинних значень показників надійності. Отримані точкові оцінки є ефективними за умови, що вибірки містять достатньо велику кількість наробітків до відмови. Водночас найбільш відповідальні вузли рухомого складу в умовах експлуатації зазнають відмов порівняно рідко, унаслідок чого ефективність точкових оцінок для таких об'єктів істотно знижується.

У зв'язку з цим виникає потреба в оцінюванні якості точкових оцінок, яке здійснюють шляхом побудови *інтервальних* оцінок. Тому на практиці спочатку обчислюють точкову оцінку показника, а потім визначають довірчий інтервал, що характеризує точність і надійність цієї оцінки.

Інтервальна оцінка задає діапазон значень, у межах якого з певною довірчою імовірністю перебуває істинне значення відповідного показника надійності. Якщо позначити отриману точкову оцінку показника надійності через $\hat{R}$, а допустиму при цьому похибку оцінювання – Δ , то істинне значення досліджуваного показника R має знаходитися в інтервалі¹:

$$\hat{R} - \Delta \leq R \leq \hat{R} + \Delta.$$

Оскільки величина Δ є випадковою, точні межі цього інтервалу встановити неможливо. Їх визначають з деякою наперед заданою імовірністю q – довірчою імовірністю, яка являє собою імовірність того, що інтервал з установленими межами накриває істинне значення досліджуваного показника

$$q = P(\underline{R} \leq R \leq \bar{R}),$$

де $\underline{R}$, $\bar{R}$ – нижня та верхня межі, в межах яких знаходиться істинне значення досліджуваного показника відповідно.

¹ У подальших розділах підручника замість узагальненого символу R можуть використовуватися конкретні показники надійності (наприклад, λ , ω , T).

Межі такого інтервалу, встановлені з довірчою імовірністю q , називаються довірчими межами, а сам інтервал $[\underline{R}, \bar{R}]$ – довірчим інтервалом.

Довірчий інтервал характеризує величину похибки під час оцінювання показників надійності, а довірна імовірність – достовірність оцінки. Найчастіше значення довірчої імовірності вибирають із ряду чисел: 0,8; 0,9; 0,95; 0,99; 0,995; 0,999.

Імовірність того, що довірчий інтервал не накриває істинне значення досліджуваного показника, називається *рівнем значущості*

$$\psi = P(\underline{R} \geq R \geq \bar{R}) = 1 - q.$$

Якщо потрібно встановити лише одну з меж довірчого інтервалу – нижню або верхню (односторонній довірчий інтервал), то відповідно задають довірчі імовірності q_1 або q_2 , де

$$q_1 = P(R \geq \underline{R});$$

$$q_2 = P(R \leq \bar{R}).$$

Імовірності q_1, q_2 пов'язані між собою співвідношенням:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - 1.$$

Під час визначення довірчих меж широко застосовують квантильні методи. Значення квантилів для найбільш поширених законів розподілу випадкових величин наведено в таблицях залежно від величини заданого значення імовірності p та кількості спостережень n .

Застосування квантильних методів потребує апріорного знання або попереднього визначення закону розподілу за результатами випробувань.

Приклад 11.1. Під час експлуатаційних випробувань п'яти електродвигунів зафіксовано наробітки до відмови у годинах: 9 000; 12 000; 8 000; 10 500; 10 000. На основі статистичних даних випробувань визначити точкову та інтервальну оцінки середнього наробітку до відмови електродвигунів. Довірчу імовірність прийняти $q = 0,95$.

Розв'язання. Точкова оцінка середнього значення (середнього наробітку до відмови) визначається як середнє арифметичне:

$$\hat{T}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (11.1)$$

де T_i – наробіток до відмови i -го електродвигуна, год.

Підставимо дані

$$\hat{T}_c = \frac{1}{5} (9000 + 12000 + 8000 + 10500 + 10000) = 9900 \text{ год.}$$

Визначаємо інтервальну оцінку (довірчий інтервал для середнього) наступним чином

$$\hat{T}_c \mp \Delta, \quad (11.2)$$

де Δ – похибка інтервалу (або половина довірчого інтервалу) для оцінки середнього значення показника надійності показує, наскільки далеко від точкової оцінки $\hat{T}_c$ може відхилятися істинне середнє значення T_c при заданій довірчій імовірності q .

За малих вибірок (невідоме істинне генеральне стандартне відхилення σ) використовують t -розподіл Стюдента. Тоді

$$\Delta = t_p \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (11.3)$$

де t_p – квантіль t -розподілу Стюдента для довірчій імовірності q та $n-1$ ступенів вільності. Значення t_p можна визначити в застосунку MS Excel за допомогою функції T.INV.2T($1-q$; n) або у літературі зі статистичної обробки експериментальних даних, наприклад у [5];

s – вибіркове середньоквадратичне відхилення.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \hat{T}_c)^2} = \quad (11.4)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{5-1} \left[(9000 - 9900)^2 + (12000 - 9900)^2 + (8000 - 9900)^2 + \right. \\ \left. + (10500 - 9900)^2 + (10000 - 9900)^2 \right]} = 1517 \text{ год.}$$

Для довірчої імовірності $P=0,95$ і $n-1=4$ ступенів вільності квантіль t -розподілу Стьюдента $t_p = 2,776$, тоді

$$\Delta = 2,776 \cdot \frac{1517}{\sqrt{5}} = 1883 \text{ год.}$$

Отже, з урахуванням довірчого інтервалу істинне середній наробіток до відмови

$$T_c \in (\hat{T}_c - \Delta; \hat{T}_c + \Delta) = \quad (11.5) \\ = (9900 - 1883; 9900 + 1883) = (8017; 11783) \text{ год.}$$

Таким чином, істинне середнє напрацювання до відмови тягових електродвигунів з довірчою імовірністю 0,95 лежить у інтервалі ($\approx 8020 \dots 11780$) год.

Необхідно відзначити, що точкова оцінка, визначена за (11.1), дає одне числове наближення істинного середнього (одне наближене числове значення), а інтервальна оцінка, визначена за (11.5) показує точність точкової оцінки (наскільки близьке отримане середнє до істинного); чим більші n або менші розкиди s , тим вужчий інтервал. Також для коректності t -підходу (підходу на основі розподілу Стьюдента) бажано, щоб розподіл напрацювань був не надто асиметричним.

Приклад 11.2. Під час експлуатаційних спостережень за групою з $N=50$ однотипних відновлюваних об'єктів облік відмов проводився у двох часових інтервалах. У першому інтервалі тривалістю $\Delta t_1=100$ год було зафіксовано $\Delta n_1=20$ відмов, у другому інтервалі тривалістю $\Delta t_2=200$ год – $\Delta n_2=40$ відмов. Необхідно оцінити параметр потоку відмов та пояснити відмінність між точковою і інтервальною оцінками.

Розв'язання. Для відновлюваних об'єктів параметр потоку відмов ω характеризує середню кількість відмов одного об'єкта за одиницю

наробітку. Точкову оцінку параметра потоку відмов визначають за формулою:

$$\omega^c(t) = \frac{\Delta n}{N \cdot \Delta t},$$

де Δn – кількість відмов за інтервал спостережень Δt ;
 N – кількість об'єктів, поставлених під спостереження;
 Δt – тривалість інтервалу спостережень, год.

Точкові оцінки параметра потоку відмов становлять:
– у першому інтервалі

$$\omega_1^c(t) = \frac{20}{50 \cdot 100} = 0,004 \text{ год}^{-1};$$

– у другому інтервалі

$$\omega_2^c(t) = \frac{40}{50 \cdot 200} = 0,004 \text{ год}^{-1}.$$

Отже, у двох часових інтервалах отримано однакові точкові оцінки параметра потоку відмов. Однак точкова оцінка є лише окремим значенням випадкової величини і не характеризує точність результату. Для оцінювання статистичної надійності отриманих значень використовують інтервальні оцінки, тобто довірчі інтервали параметра потоку відмов. За припущенням пуассонівського характеру потоку відмов наближену 95 %-у інтервальну оцінку параметра потоку відмов можна визначити за співвідношенням¹

$$\omega \in \left[\frac{n - 1,96\sqrt{n}}{W}; \frac{n + 1,96\sqrt{n}}{W} \right],$$

де W – сумарне напрацювання групи об'єктів у певному інтервалі, год.

¹ Наведений вираз є наближенням і застосовується за умови достатньо великої кількості відмов ($n \geq 10$). За малої кількості відмов для побудови довірчих інтервалів параметра потоку відмов доцільно використовувати точні формули на основі квантилів розподілу χ^2 .

Сумарний наробіток групи об'єктів у першому інтервалі становить

$$W_1 = N \cdot \Delta t_1 = 50 \cdot 100 = 5000 \text{ год.}$$

Сумарний наробіток групи об'єктів у другому інтервалі становить

$$W_2 = N \cdot \Delta t_2 = 50 \cdot 200 = 10000 \text{ год.}$$

Для першого інтервалу при $\Delta n_1 = 20$ маємо:

$$\omega_1 \in \left[\frac{20 - 1,96\sqrt{20}}{5000}; \frac{20 + 1,96\sqrt{20}}{5000} \right] \approx [0,00225; 0,00575] \text{ год}^{-1}.$$

Для другого інтервалу при $\Delta n_2 = 40$ маємо:

$$\omega_2 \in \left[\frac{40 - 1,96\sqrt{40}}{10000}; \frac{40 + 1,96\sqrt{40}}{10000} \right] \approx [0,00276; 0,00524] \text{ год}^{-1}.$$

Таким чином, за однакових точкових оцінок параметра потоку відмов інтервальні оцінки істотно відрізняються за шириною. Це пояснюється тим, що у другому інтервалі обсяг статистичної інформації є більшим, а отже, невизначеність оцінювання параметра потоку відмов менша. Отже, інтервальна оцінка є необхідним доповненням до точкової, оскільки вона дозволяє оцінити точність і достовірність результатів, обґрунтовано порівнювати різні періоди експлуатації та приймати інженерні рішення у практиці забезпечення надійності рухомого складу.

11.1. Види випробувань на надійність

Розробка, впровадження у виробництво та серійний випуск нових технічних об'єктів щоразу супроводжується контролем якості як самого об'єкта, так і його складових – систем, підсистем, вузлів, деталей і комплектуючих. Для складних технічних систем визначення та контроль значень параметрів елементів не завжди може забезпечити високу достовірність визначення придатності та якості системи в цілому, ос-

кільки часто невідомі зв'язки оцінок якості зі значеннями контрольованих параметрів. Крім того, оскільки функціонування технічної системи визначається процесами, що породжуються, в тому числі, взаємодією елементів і середовищ один з одним, воно не завжди залежить лише від параметрів елементів. Тому, незважаючи на наявність аналітичних методів дослідження, остаточно судити про якість об'єкта та його придатності до застосування можна лише за результатами випробувань або експлуатації об'єкта в цілому та його елементів.

Основне завдання випробувань технічних об'єктів (елементів і систем) – отримання інформації про їхню працездатність у конкретних умовах експлуатації, застосування або використання. Під час розроблення нових технічних об'єктів основними завданнями випробувань є перевірка й демонстрація нових технічних рішень, конструкцій або методів, оцінювання альтернативних варіантів, попереднє визначення характеристик об'єкта, одержання вихідної інформації для подальшого доопрацювання, відпрацювання експериментального зразка, уточнення значень параметрів і допустимих меж їхньої варіації, відпрацювання основних прийомів експлуатації та тренування обслуговуючого персоналу, визначення характеристик надійності і т. ін.

Випробування технічних об'єктів загалом можна класифікувати за багатьма ознаками. Залежно від цілей і характеру одержуваної інформації технічні об'єкти піддаються *функціональним випробуванням* і *випробуванням на надійність*.

Функціональні випробування проводяться з метою перевірки здатності виробу виконувати роботу, для якої він призначений. Зазвичай функціональні випробування проводяться на стадії дослідних зразків. На стадії серійного виробництва в них зазвичай немає необхідності, оскільки при незмінній конструкції і стабільній технології виготовлення функціональні показники виробу залишаються стабільними. Зазвичай функціональні показники (на відміну від показників надійності) досить детерміновані і мало відрізняються у різних зразків одного виробу, тому кількість випробовуваних зразків може бути невеликою і функціональні властивості визначаються при короточасних експериментах.

Оскільки надійність – одна з основних властивостей будь-якого технічного об'єкта, при проведенні функціональних випробувань попутно оцінюється і надійність виробів, але тільки в тій мірі, в якій вона виявляється протягом невеликого напрацювання (виняток становлять тривалі функціональні випробування в різноманітних умовах експлуатації, які іноді поєднуються з експлуатаційними випробуваннями на надійність).

Випробування на надійність, на відміну від функціональних, проводяться спеціально для визначення або оцінки показників надійності, в тому числі окремо – показників властивостей, що складають надійність (випробування на безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість).

Експериментальне визначення рівня надійності та її залежності від основних експлуатаційних факторів дозволяє підтвердити характеристики надійності, виявити слабкі місця об'єкта, розробити заходи щодо підвищення надійності, сформулювати раціональну систему технічного обслуговування і ремонту, визначити ефективність і економічну доцільність подальшої експлуатації, перевірити розрахунки і прогнози, виконані при проектуванні, оцінити якість виготовлення об'єкта тощо.

Схема класифікації випробувань на надійність технічних об'єктів наведена на рис. 11.1.



Рис. 11.1. Схема класифікації випробувань на надійність

За **призначенням** випробування поділяють на *дослідні, контрольні, порівняльні та визначальні*.

Дослідні випробування проводять з метою вивчення нових характеристик і властивостей об'єкта: визначення границь витривалості, побудови кривих утомленості деталей, встановлення законів розподілу відмов, дослідження закономірностей зношування, деформування та руйнування, а також процесів корозії й старіння матеріалів. Такі випробування застосовують і для порівняння показників надійності агрегатів, виготовлених за різними конструктивними схемами або за різними технологіями.

Дослідні випробування виконують за *однофакторними* або *багатофакторними* схемами.

Однофакторні випробування характеризуються тим, що вплив кількох факторів аналізують шляхом варіювання лише одного з них, тоді як інші параметри залишаються сталими. Це дозволяє чітко виокремити та кількісно оцінити дію кожного фактора на показники надійності об'єкта.

Багатофакторні випробування передбачають одночасну зміну кількох впливових факторів, що дозволяє значно прискорити дослідження та отримати більш повну інформацію про властивості об'єкта. На відміну від однофакторних схем, вони забезпечують ширший пізнавальний ефект і дають можливість оцінити взаємодію факторів, які впливають на надійність машин.

Дослідні випробування загалом становлять наукову основу розвитку машинобудування: від їх системності й методичної досконалості залежить надійність нових конструкцій. Основний обсяг таких робіт виконується до початку серійного виробництва, проте вони тривають і надалі – для удосконалення конструкцій, технологій виготовлення й експлуатаційних властивостей машин.

Визначальні випробування проводять для отримання фактичних показників надійності нових або модернізованих машин, оцінки відповідності технічній документації та уточнення нормативів. Оскільки такі випробування часто призводять до вичерпання ресурсу агрегатів, вони дають можливість виявляти слабкі конструктивні елементи та формувати заходи щодо підвищення довговічності й міцності вузлів. Зазвичай визначальним випробуванням піддається партія зразків новорозробленого виробу.

Контрольні (підконтрольні) випробування проводяться для перевірки якості та стабільності показників надійності, а саме відповідності надійності вимогам, встановленим у нормативно-технічній докумен-

тації. Такі випробування проводять у складі попередніх, приймальних, кваліфікаційних, пред'явних, приймально-здавальних, періодичних, типових, атестаційних, державних, міжвідомчих та відомчих процедур. Через вибіркового характер випробувань їх результатом часто є не число, а довірчий інтервал, в який із заданою достовірністю потрапляє невідомий генеральний параметр надійності. Вибірковість контрольних випробувань означає, що при прийманні або бракуванні партії існує певна імовірність, що прийняте рішення є помилковим. Однак в обох випадках може бути забезпечена практично будь-яка достовірність результату, настільки близька до одиниці, наскільки це можливо.

Результатом випробувань має бути затвердження про відповідність або невідповідність партії вимогам надійності. Залежно від результату партія приймається або бракується. Зазвичай контрольні випробування проводяться періодично для серійно випускаються виробів.

Порівняльні випробування виконують для подібних технічних об'єктів в ідентичних умовах, щоб встановити відмінності у властивостях та ефективності конструктивних рішень.

За **рівнем проведення** випробування поділяють на *державні, міжвідомчі та відомчі* – їх здійснюють відповідні комісії для визначення доцільності серійного виробництва.

За **стадією розробки** випробування поділяються на *доводочні, попередні та приймальні*.

Доводочні випробування. Очікуваний рівень надійності, який закладається під час проектування рухомого складу та його складальних одиниць, як правило, істотно відрізняється від фактичного рівня надійності дослідних зразків локомотивів і вагонів. Особливості роботи нового рухомого складу в реальних умовах експлуатації (змінні навантаження, кліматичні фактори, режими тяги й гальмування), які неможливо повністю врахувати на етапі проектування, виявляються під час випробувань. У зв'язку з цим виникає необхідність доведення конструкції до заданого рівня надійності. Це складне інженерне завдання вирішується шляхом проведення доводочних випробувань.

Доводочні випробування належать до дослідних і виконуються на етапі створення рухомого складу з метою оцінювання впливу конструктивних і технологічних змін, що впроваджуються для досягнення нормативних значень показників надійності, довговічності та ремонтпридатності.

Доводочні випробування рухомого складу залізниць проводять з метою:

- усунення конструктивних і технологічних недоліків нових серій локомотивів і вагонів до початку їх серійного виробництва;
- усунення недоліків, виявлених під час випробувань і експлуатації серійного рухомого складу;
- удосконалення окремих вузлів і систем (тягових приводів, гальмового обладнання, підшипникових вузлів, пневматичних і електричних систем) з метою підвищення надійності, зниження маси та зменшення витрат на технічне обслуговування і ремонт.

Основний обсяг доводочних випробувань виконується до початку серійного випуску рухомого складу. Водночас такі випробування не припиняються і в подальшому, оскільки зі збільшенням напрацювання в експлуатації виявляються специфічні відмови та конструктивні недоліки, усунення яких можливе лише шляхом проведення цілеспрямованих доводочних робіт.

Практика експлуатації рухомого складу свідчить, що систематичне та методично обґрунтоване виконання доводочних і дослідних випробувань є необхідною умовою забезпечення та гарантування високого рівня надійності нових конструкцій локомотивів і вагонів.

Попередні випробування – це контрольні випробування дослідних зразків рухомого складу, які проводяться підприємствами-виробниками з метою підготовки нових типів і серій локомотивів та вагонів до подання на приймальні, державні, міжвідомчі або відомчі випробування.

Приймальні випробування – це контрольні випробування дослідних зразків або дослідних партій рухомого складу, що проводяться з метою оцінювання доцільності їх серійного виробництва та можливості використання за призначенням в умовах експлуатації залізниць.

За **стадією виробництва** розрізняють *кваліфікаційні, пред'явні, приймально-здавальні, періодичні, інспекційні, типові, атестаційні та сертифікаційні* випробування.

Кваліфікаційні – контрольні випробування установчої серії або першої промислової партії рухомого складу, що проводяться з метою оцінювання готовності підприємства-виробника до серійного випуску нової конструкції у заданих обсягах із забезпеченням установленого рівня надійності.

Пред'явні – контрольні випробування рухомого складу, які виконуються службою технічного контролю підприємства-виробника перед поданням продукції представнику замовника, споживача або іншим приймальним органам для підтвердження відповідності встановленим вимогам.

Приймально-здавальні – контрольні випробування рухомого складу, що проводяться в межах приймального контролю з метою підтвердження відповідності показників якості та надійності вимогам нормативно-технічної документації.

Періодичні – контрольні випробування рухомого складу, які виконуються у встановлених обсягах і строки відповідно до нормативно-технічної документації з метою контролю стабільності показників якості та надійності й підтвердження можливості подальшого серійного виробництва.

Інспекційні – випробування окремих видів рухомого складу, що проводяться з метою контролю стабільності якості та надійності продукції, а також підтвердження доцільності її подальшого випуску.

Типові – контрольні випробування рухомого складу, під час яких оцінюється ефективність і доцільність змін у конструкції, що впроваджуються в процесі модернізації, з погляду впливу на показники надійності.

Атестаційні – випробування, які проводяться з метою оцінювання рівня якості та надійності рухомого складу під час його атестації за встановленими категоріями.

Сертифікаційні – контрольні випробування рухомого складу, що виконуються з метою встановлення відповідності його характеристик вимогам національних та (або) міжнародних нормативно-технічних документів у частині безпеки та надійності.

Залежно від того, **які властивості надійності досліджуються**, випробування рухомого складу поділяють на випробування на *безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність*.

Випробування на *безвідмовність* являють собою спрямовані ресурсні випробування, що виконуються за спеціальними методиками та спеціально підібраними режимами з метою ініціювання відмов певного виду. До цього виду також належать ресурсні випробування, під час яких відтворюються відмови, не пов'язані з ушкодженнями елементів, наприклад, випробування для перевірки стабільності регулювань і налаштувань систем рухомого складу.

Випробування на *довговічність* (ресурсні випробування), у свою чергу, класифікують за низкою ознак:

– за призначенням і метою розрізняють довідкові, попередні, приймальні, визначальні, контрольні, дослідницькі та експлуатаційні випробування;

– за об’єктами випробувань вони можуть проводитися для окремих деталей, елементів, вузлів, агрегатів, а також для рухомого складу або системи в цілому;

– за темпами та тривалістю випробування поділяють на нормальні, скорочені та прискорені;

– залежно від характеру відтворюваних ушкоджень і відмов виділяють випробування на зношування, втому, корозію, старіння, повзучість, кавітацію, а також на дію механічних, гідравлічних, теплових, електричних та інших факторів;

– за способом проведення розрізняють стендові, експлуатаційні та полігонні випробування.

Крім того, випробування класифікують за критеріями граничного стану (до повної відмови, до досягнення граничних значень параметрів тощо) і за прийнятими планами випробувань.

Випробування на *ремонтпридатність* проводять з метою визначення показників ремонтпридатності рухомого складу за трьома основними напрямками: технічне обслуговування, поточний ремонт і капітальний ремонт. Для кожного з напрямів оцінюють трудомісткість, тривалість та вартість виконання ремонтних операцій. Розв’язання цього завдання здійснюється двома способами: шляхом імітації окремих операцій (для попередніх оцінок) та шляхом безпосередніх спостережень під час випробувань і експлуатації (для остаточних оцінок).

Випробування на *збережуваність* виконуються з метою визначення показників збережуваності рухомого складу під час зберігання і транспортування. Для виробів масового та великосерійного виробництва такі випробування, як правило, проводяться обмежено.

За **місцем проведення** випробування бувають *лабораторними, стендовими, полігонними, експлуатаційними, натурними та модельовальними*.

Лабораторні випробування проводяться в лабораторних умовах і призначені, зокрема, для оцінювання стійкості матеріалів, деталей і з’єднань до механічних впливів, зношування, корозії та кавітації. За результатами таких випробувань визначають опір матеріалів експлуатаційним впливам і довговічність деталей, які передбачається використовувати під час виготовлення нового рухомого складу за заданих режимів роботи.

Стендові випробування виконуються на спеціалізованому випробувальному обладнанні (стендах) і призначені для визначення ресурсу основних агрегатів і механізмів нового або модернізованого рухомого складу. У процесі стендових випробувань виявляються конструктивні

елементи, що лімітують ресурс агрегатів, а також досліджуються фактори й фізико-хімічні процеси, які визначають їх довговічність.

Полігонні випробування проводяться на спеціалізованих полігонах, що є складними інженерними спорудами, обладнаними елементами для відтворення різних умов руху та навантажень. На сучасних полігонах можливе виконання широкого комплексу досліджень, зокрема функціональних і спеціальних випробувань, перевірка міцності несучих конструкцій рухомого складу, а також відпрацювання методів відновлення пошкоджень заданого виду.

Експлуатаційні випробування здійснюються безпосередньо в процесі експлуатації рухомого складу. Розрізняють три основні різновиди експлуатаційних випробувань:

- дослідні (дослідна експлуатація або пробіг дослідного зразка (зразків) РС), що проводяться кваліфікованим персоналом під регулярним контролем спеціалістів. Такі випробування можуть проводитися як у складі попередніх, так і приймальних випробувань. При цьому обліковується напрацювання РС та виконана робота, а всі порушення реєструються й аналізуються за період випробувань;

- підконтрольні (підконтрольна експлуатація дослідного зразка (зразків) РС або РС установчої серії), що супроводжується систематичним контролем технічного стану кожної одиниці рухомого складу в умовах експлуатаційних підрозділів спеціально підготовленим персоналом з метою підвищення обсягу та достовірності отримуваної інформації. Такі випробування можуть проводитися як у складі кваліфікаційних, так і сертифікаційних випробувань;

- штатні (штатна експлуатація рухомого складу установчої серії або рухомого складу серійного виробництва) являють собою природну експлуатацію, хід і результати якої спостерігаються персоналом споживача, спеціально призначеним або підготовленим для цієї мети. Такі випробування можуть проводитися в межах кваліфікаційних і сертифікаційних випробувань для рухомого складу установчої серії, а також у складі періодичних і типових випробувань для рухомого складу серійного виробництва.

Слід зауважити, що під час експлуатаційних спостережень, як правило, не здійснюють попереднього планування обсягу спостережень і не визначають вид цензурування. Оброблення виконується на основі фактичних статистичних даних про відмови, зафіксованих протягом певного періоду експлуатації технічного об'єкту.

На підставі отриманих даних визначають точкові та інтервальні (граничні) оцінки показників надійності. Ці оцінки повинні відповіда-

ти спостереженій відносній похибці та заданій довірчій імовірності, або, навпаки, спостереженій довірчій імовірності при заданій відносній похибці.

Натурні випробування полягають у випробуванні виготовленого рухомого складу в умовах, максимально наближених або тотожних умовам його фактичного використання. При цьому впливи на об'єкт відповідають його цільовому призначенню, а показники властивостей визначаються безпосередніми вимірюваннями.

Випробування з *використанням моделей* передбачають виконання розрахунків на математичних або фізико-математичних моделях об'єкта випробувань і (або) дії на нього у поєднанні з натурними випробуваннями окремих складових частин (дослідно-теоретичний метод). Також застосовуються фізичні моделі об'єкта. Результати натурних випробувань використовуються як вихідні дані для побудови та уточнення моделей.

За **протяжністю** розрізняють *нормальні*, *скорочені* та *прискорені* випробування.

Нормальні випробування – це випробування, під час яких інформацію про надійність рухомого складу отримують за той самий календарний інтервал часу, що відповідає реальним умовам його експлуатації.

Скорочені випробування проводяться за спрощеною програмою і, порівняно з нормальними, забезпечують одержання даних про надійність у значно коротші календарні строки. Скорочення тривалості досягається шляхом ущільнення процесу випробувань: безперервною (цілодобовою) роботою об'єктів, зменшенням кількості та тривалості холостих режимів, підвищенням частоти робочих циклів, а також імітацією дії робочого середовища. Це дає змогу за обмежений час відтворити напрацювання, співмірне з тривалою експлуатацією.

Під час скорочених випробувань замість природних робочих середовищ можуть застосовуватися їх штучні аналоги, фізико-механічні властивості яких подібні до реальних, але зносостійкість істотно вища. Використання таких замінників дозволяє значно інтенсифікувати процеси зношування без зміни їх фізичної природи.

Суттєвою перевагою скорочених випробувань є те, що прискорення процесу досягається без спотворення механізмів втрати працездатності рухомого складу. Тому їх результати, як правило, добре узгоджуються з експлуатаційними даними.

Прискорені випробування – це випробування, методи та умови проведення яких забезпечують отримання необхідної інформації про надійність рухомого складу за менший час, ніж при нормальних випро-

буваннях. Скорочення тривалості досягається за рахунок інтенсифікації фізико-хімічних і фізико-механічних процесів пошкодження та руйнування елементів: підвищення навантажень, швидкостей, температур, рівнів вібрації тощо.

Разом із тим форсування режимів прискорених випробувань має обмеження. Надмірне підвищення інтенсивності впливів може призвести до спотворення результатів, оскільки кожен процес пошкодження має критичну область, після досягнення якої змінюється характер руйнування. Тому режими та методи прискорених натурних випробувань повинні вибиратися так, щоб не виходити за межі цієї області, зберігаючи якісну подібність процесів.

Для забезпечення достовірності результатів прискорених випробувань необхідно забезпечити їх узгодженість з експлуатаційними умовами. Розрізняють фізичну та математичну подібність.

Фізична подібність полягає в однаковості виду та характеру відмов під час форсованих і експлуатаційних випробувань.

Математична подібність означає рівність імовірностей безвідмовної роботи рухомого складу при прискорених та експлуатаційних випробуваннях, що відповідає принципу рівних імовірностей.

11.2. Етапи випробувань на надійність

Можна виділити два етапи *в підготовці* випробувань на надійність:

- *перший етап* включає ознайомлення з конструктивними особливостями виробу, режимами його експлуатації, вивчення і попередній аналіз спостережуваних відмов;

- *другий етап* присвячений плануванню випробувань.

У технічно обґрунтованих випадках допускається не проводити планування випробувань (спостережень). У разі фіксованого об'єму вибірки планування випробувань зводиться до визначення необхідного наробітку кожного зразка (наробітку до відмови, до цензурування), відповідної заданої точності і довірчої вірогідності оцінки показника надійності.

Питання організації випробувань є загальними для будь-яких видів випробувань на надійність.

Основні фактори, що враховуються при організації випробувань. При організації випробувань слід звернути увагу на вибір об'єк-

тів випробувань, періодичність контролю, режим експлуатації та умови навколишнього середовища.

Збір інформації про надійність проводиться як для одиниці рухомого складу в цілому, так і для її складових частин.

Об'єктами випробувань (спостережень) є однотипні вироби (певні серії локомотивів, вагонів та їх елементи), що не мають конструктивних відмінностей і виготовлені за єдиною технологією та одночасно поставлені під спостереження.

Одиниці рухомого складу, що піддаються випробуванням, повинні бути прийняті в установленому порядку службою технічного контролю заводу-виробника, інспекцією певного департаменту АТ «Укрзалізниця» та укомплектовані відповідно до чинної нормативної документації.

Періодичність контролю за виробами в процесі випробувань може бути постійною (безперервною) і періодичною. Найбільш повну інформацію дає безперервний контроль, який дозволяє більш точно фіксувати моменти відмов виробів. Однак такий контроль не завжди може бути забезпечений.

Як правило, постійні спостереження проводяться для виробів, відмова яких пов'язана з небезпекою для людини або може призвести до великих економічних втрат, а також для виробів дрібносерійного та індивідуального виробництва.

Періодичні спостереження проводяться для виробів серійного та масового виробництва.

Режим експлуатації та умови навколишнього середовища мають значний вплив на рівень фактичної надійності виробу.

Якщо виріб призначений для функціонування в широкому діапазоні параметрів навколишнього середовища, то доцільно задавати і перевіряти показники надійності для різних (наприклад, граничних) значень параметрів середовища. Наприклад, вагон працює в діапазоні температур від +40 до – 60 °С. Якщо задано рівень показника надійності і спеціально не обумовлено відповідні умови, то при випробуваннях слід забезпечити найбільш характерні для даного виробу умови функціонування.

В умовах випробувань рухомому складу проводять встановлені види планових технічних обслуговувань і ремонтів, передбачених документацією з технічного утримання з дотриманням регламентованих заводом-виробником обсягів і періодичності технічного обслуговування та ремонту.

Основні етапи для отримання оцінок показників надійності:

– *I етап* – вибір плану випробувань на надійність¹ – визначення типу та схеми випробувань (однократні, багатократні, з повним чи частковим спостереженням), що забезпечує отримання достатнього обсягу даних для оцінювання;

– *II етап* – планування випробувань – розроблення програми та методики випробувань, включно з визначенням необхідного обсягу випробувань² (кількості зразків, тривалості спостережень, умов експлуатації);

– *III етап* – збирання необхідної інформації – фіксування результатів випробувань або експлуатаційних спостережень, у тому числі часу (наробітку) до відмови та до цензурування³, умов проведення випробувань, характеристик об'єкта;

– *IV етап* – статистична обробка отриманої інформації – виконання математичної обробки даних, побудова емпіричних і теоретичних розподілів, розрахунків та інтерпретація показників надійності.

Розглянемо більш детально ці етапи.

11.3. Вибір плану випробувань на надійність

На практиці в більшості випадків немає можливості так організувати випробування, щоб отримати експериментальні дані з надійності необхідного виду і в достатньому обсязі. Зазвичай завдання полягає в тому, щоб оцінити показники надійності на основі того статистичного матеріалу, який є в наявності. На характер одержуваних статистичних даних про надійність значний вплив має стратегія випробувань, а саме: кількість об'єктів, що піддаються випробуванням, порядок надходження об'єктів на випробування, порядок контролю функціонування,

¹ План випробувань (спостережень) на надійність – сукупність правил, що встановлюють обсяг вибірки, порядок проведення випробувань, критерії їх завершення і прийняття рішень за результатами випробувань.

² Обсяг випробувань на надійність – характеристика правил випробувань на надійність, що включає кількість випробовуваних зразків, сумарну тривалість випробувань в одиницях наробітку та (або) кількість серій випробувань.

³ Цензурування – подія, що полягає у припиненні випробувань або експлуатаційних спостережень об'єкта до настання його відмови (граничного стану), унаслідок чого фактичне значення напрацювання до відмови перевищує зафіксоване та залишається невідомим. Можливі причини цензурування: різні часи початку чи закінчення випробувань або експлуатації; зняття об'єктів з випробувань/експлуатації з організаційних чи технічних причин; переведення об'єкта в інший режим використання; проведення оцінки надійності до відмови всієї групи об'єктів.

порядок відновлення або заміни об'єктів, що відмовили, умов закінчення випробувань. Відповідно стратегії, і відповідно, плани випробувань відрізняються один від одного наступними факторами:

- *кількістю об'єктів випробувань* – випробування одного об'єкта або групи об'єктів;

- *порядок проведення випробувань*:

- одночасне або неодноразове випробування всіх об'єктів;

- контроль функціонування об'єктів безперервний, періодичний або тільки перед початком і після закінчення випробувань;

- випробування з відновленням (заміною) об'єктів, що відмовили, або без відновлення (заміни);

- *критерій припинення випробувань*: випробування до відмови всіх об'єктів, до закінчення фіксованого наробітку (часу або пробігу) або до певної кількості відмов.

Нагадаємо, що об'єктами випробувань є однотипні вироби, які не мають конструктивних або інших відмінностей, виготовлені за єдиною технологією і випробовувані в ідентичних умовах.

Вибір стратегії, і відповідно, плану випробувань залежить від типу об'єкта випробувань, цілей випробувань, оцінюваних показників надійності, умов випробувань та інших техніко-економічних чинників.

У процесі збирання інформації про надійність елементів одиниці рухомого складу можливі різні варіанти планів випробувань.

Існує 16 планів випробувань, але основними з них є: $[NUN]$, $[NUT]$, $[NUr]$, $[NRT]$, $[NRr]$, $[NR(r, T)]$, $[NMT]$, $[NMr]$.

Як бачимо, позначення плану випробувань складається, як правило, з трьох символів у дужках, де перший символ позначення плану визначає обсяг вибірки виробів, що піддаються випробуванням, другий символ вказує на можливість відновлення або заміни в процесі випробувань елементів, що відмовили, третій символ вказує принцип закінчення випробувань. Наприклад, план $[N=120, M, r=16]$ означає, що на випробування (спостереження) поставлено 120 об'єктів з відновленням після відмов до тих пір, поки кількість відмов не досягне 16. Вид дужок вказує на порядок надходження об'єктів на випробування і режим контролю їх функціонування.

Зазвичай для промислових виробів наробіток до відмови оцінюють у годинах (наприклад, моторесурс дизеля), але стосовно магістрального залізничного транспорту, для оцінки надійності одиниць рухомого складу, використовують пробіг, тобто відстань, пройдену рухомим складом у робочому стані. Тому в планах випробувань на надійність рухомого складу для оцінки тривалості спостережень користуються пробігом та

замість літери « T » у позначені планів застосовують літеру « L ». Таким чином, плани спостережень за надійністю рухомого складу можуть бути представлені у вигляді – $[NUL]$, $[NRL]$, $[NR(r, L)]$, $[NML]$.

Як уже зазначалося, під час проведення випробувань припускають, що вироби піддаються випробуванням одночасно і контроль здійснюється безперервно. Оскільки на практиці ці умови часто не виконуються, використовуються додатково такі позначення для реальних планів випробувань:

- якщо вироби надходять на випробування неодноразово або знімаються з випробувань у довільні моменти часу з якихось причин, то такі плани позначаються так само, але укладаються в круглі дужки (...);

- якщо під час випробувань контроль здійснюють періодично, через певні інтервали часу (наробітку), то відповідне умовне позначення укладають у подвійні дужки (круглі або квадратні), наприклад, $((NUT))$ – випробовують N виробів, вироби, що відмовили, не замінюють і не відновлюють, контроль проводять періодично, випробування закінчують після закінчення фіксованого відрізка часу (наробітку), вироби можуть надходити на випробування або зніматися з випробувань із якихось причин у довільні моменти часу;

- випробування за так званою непараметричною схемою, коли кожен з N виробів випробовується протягом фіксованого наробітку T , а контроль здійснюється тільки перед початком і після закінчення випробувань, то відповідне умовне позначення стратегії укладається у фігурні дужки {...}. Ця схема випробувань є граничним випадком періодичного контролю. За такого контролю вироби, що відмовили, виявляють тільки після закінчення випробувань, отже, питання про заміну або відновлення виробів, що відмовили, у процесі випробувань не виникає.

Перелічені вище фактори випробувань і відповідні умовні позначення зведено в табл. 11.1.

Класифікація стратегій випробувань в умовних позначеннях табл. 11.1, з огляду на здебільшого організаційний аспект випробувань (спостережень), не відображає однозначно характер одержуваного статистичного матеріалу. Тим часом за деяких формально різних стратегій випробувань характер статистичного матеріалу виходить однаковим, і, отже, кількість типів вибірок насправді істотно менша за кількість стратегій випробувань.

З погляду характеру статистичного матеріалу за будь-яких стратегій випробувань виходять тільки три типи випадкових величин (реалізацій), що складають вибірку:

Фактори, що характеризують стратегію випробувань, та їхні умовні позначення

Фактор	Характеристика плану випробувань	Позначення
Кількість об'єктів випробувань	один об'єкт	1
	більше одного об'єкта	N
Можливість відновлення або заміни під час випробувань	не відновлюються і не замінюються	U
	не відновлюються, але замінюються	R
	відновлюються	M
Критерій припинення випробувань	наробіток об'єкта	$T(L)$
	загальна кількість відмов	r
	загальний наробіток об'єктів	$T_{\Sigma}(L_{\Sigma})$
	за результатами випробувань у будь-який момент	S
	відмова або наробіток i -го об'єкта	z
	з випробувань знімається по n об'єктів	n
Порядок надходження об'єктів на випробування	одночасно	[]
	неодночасно	()
Режим контролю функціонування об'єктів	безперервно	[] або ()
	періодично	[[]] або (())
	тільки перед початком і по закінченню	{ }

1) наробіток до відмови (або наробіток між відмовами, або наробіток до граничного стану, або час від початку до закінчення відновлення, або час зберігання до відмови); 2) безвідмовні наробітки;

3) наробітки до моменту контролю, за якого виявлено відмову (у разі відсутності безперервного контролю).

З урахуванням реального сенсу цих величин нижче вони називаються відповідно: повні реалізації, неповні реалізації, умовні реалізації – і мають такі графічні позначення:  повна реалізація (відмова);  неповна реалізація (призупинення);  умовна реалізація.

Якщо випробування (спостереження) ведуть до фіксованого числа відмов r , то відмову, що збігається з моментом закінчення випробувань, відзначають додатково кружком, і відповідна повна реалізація і призупинення випробувань (спостережень) позначається . У цих позначеннях результат будь-якого випробування на надійність (вибір-

ка) може бути представлений графічно відповідним набором реалізацій – *діаграмою реалізацій*. Така діаграма наочно й однозначно відображає специфіку одержуваного статистичного матеріалу (тип вибірки). При цьому виявляється можливим виявити низку типових діаграм реалізацій, до яких зводяться результати багатьох реальних стратегій (планів) випробувань.

У великому плані експериментальні дані поділяють на два типи: тип 1 – експериментальні дані, які отримують за стратегій із *безперервним* контролем; тип 2 – експериментальні дані, які отримують за стратегій із *періодичним* контролем.

Діаграми реалізацій для випробувань з *безперервним* контролем функціонування подано в табл. 11.2.

План спостережень $[NUN]$ або *повний план* означає, що під спостереження взято партію з N одиниць рухомого складу або їхніх складальних одиниць і що випробування проводять до відмови всіх об'єктів, водночас об'єкти, що відмовили, не замінюють новими. Таким чином, за повного плану визначають напрацювання до відмови виробів, що ремонтуються. Якщо об'єкти ремонтвані, то при такому плані виявляють наробіток тільки до першої відмови, потім їх виключають із дослідження.

За планом $[NUN]$ результати випробувань містять тільки повні реалізації, причому момент останньої відмови є моментом закінчення випробувань. Отримана при цьому вибірка (тип 1А) є прикладом експериментальних даних класичного типу – *повна вибірка*.

Неодночасне надходження виробів на випробування (експлуатацію) у цьому разі не вносить принципових змін у характер одержуваної інформації, тому що за такої стратегії «за визначенням» кожний виріб, коли його поставили на випробування, випробовується (або спостерігається) до відмови. Аналогічні за характером результати (r повних реалізацій) отримують і за стратегії $[1Rr]$ – випробування одного виробу з відновленням до фіксованої кількості відмов r .

У зв'язку із застосуванням для одиниць рухомого складу системи планово-попереджувальних ремонтів широке застосування мають плани із фіксованим наробітком $T(L)$, де T, L – у загальному випадку – встановлений наробіток, після якого проводиться планове відновлення працездатності об'єкта або його замінюють новим.

Для одиниць рухомого складу та їх складальних одиниць вибір $T(L)$ залежить від виду об'єкта і характеру відмови.

Таблиця 11.2

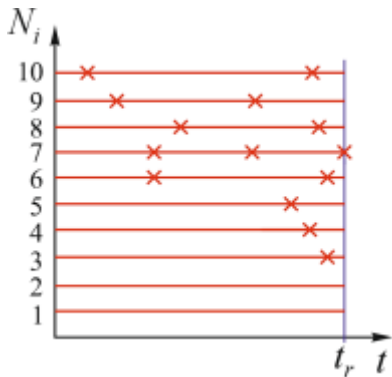
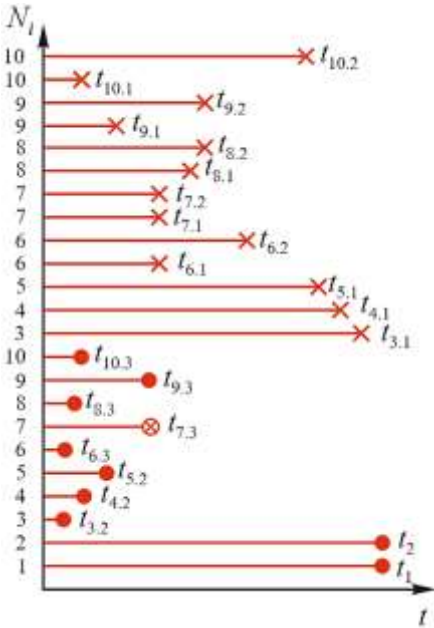
Типи експериментальних даних під час безперервного контролю функціонування

Умовне позначення плану (стратегії) випробувань (спостережень)	Графічна модель плану випробувань (спостережень)	Діаграма реалізацій	Умовне позначення типу діаграми (тип вибірки)	Стратегії, що дають аналогічні діаграми
1	2	3	4	5
[NUN]			1A	[1Mr] [1Rr] (NUN)
[NUT]			1Б	(NUT)

Продовження табл. 11.2

1	2	3	4	5
[N _{Ur}]			1B	—
[N _{RT}]			1Г	[N _{MT}] (N _{MT}) (N _{RT})

Закінчення табл. 11.2

1	2	3	4	5
[NRr]			1Д	[NMr] (NMr) (NRr) (NUr)

Для локомотивів в якості $T(L)$ може бути використаний наробіток між заводськими ремонтами або від заводського ремонту (виготовлення) до ПР-3, а також пробіги між ТО-3, ПР-1, ПР-2. За планом $[NUT]$ спостерігається стан усіх N об'єктів протягом наробітку T .

При першій же відмові i -го об'єкта з напрацюванням $t_i < T$ подальше спостереження за об'єктом припиняється. Крім того, до даних про результати спостережень не включають відомостей про об'єкти, які не відмовили за наробіток T , або були поставлені в ремонт із меншим, ніж T наробітком. За планом $[NUT]$, якщо, наприклад, N_1 виробів відмовили, то результати випробувань містять N_1 повних реалізацій, значення яких не перевищують тривалості випробувань T , і $(N - N_1)$ однакових неповних реалізацій (вибірка типу 1Б). Такий характер має вибірка типу 1В, з тією лише різницею, що в цьому випадку момент закінчення випробувань збігається з моментом відмови. Вибірки типів 1Б і 1В є прикладами так званої *усіченої вибірки*¹ або, точніше, однократно усіченої зверху. Як видно з табл. 11.2, найзагальнішим випадком для випробувань із безперервним контролем є вибірки типів 1Г і 1Д – багаторазово усічені вибірки.

План спостережень $[NUT]$ може бути використаний як для ремонтних об'єктів, так і для неремонтованих. Відмінність полягає в тому, що відремонтований після першої відмови об'єкт надалі зі спостережень виключається.

План спостережень $[NUR]$ можна охарактеризувати так: під спостереження поставлено N об'єктів, виробі, що відмовили, новими не замінюють, спостереження продовжують до накопичення даних про відмови або деякі граничні стани. Щойно в об'єкта $N_{i=r}$ відбудеться відмова, спостереження припиняють, хоча $(N-r)$ об'єктів ще не мали відмов і продовжують працювати. Подальше після першої відмови напрацювання кожного з r об'єктів, що відмовили до $t \ll T_r$, не враховується, навіть якщо вони після ремонту знову використовуються в експлуатації. У практиці розрахунків показників надійності рухомого складу цей план використовується рідко.

План спостережень $[NRr]$ показує, що взяті під спостереження N об'єктів після відмови замінюються новими, спостереження ведуть до

¹ Усічена вибірка – це вибірка результатів випробувань на надійність, у яку включають лише ті спостереження, значення яких потрапляють у наперед заданий інтервал; усі події поза цим інтервалом до вибірки не потрапляють (не реєструються). Оцінювання виконується для умовного, усіченого на цьому інтервалі розподілу. Не плутати з цензурованою вибіркою, де спостереження включені, але відомі лише частково (наприклад, $T_i > T$).

одержання r відмов. Як і план $[NUr]$, план $[NRr]$ так само досить рідко використовують під час розрахунку показників.

Найзручнішим стосовно одиниць рухомого складу, виходячи з умов обслуговування і ремонту, мінімальних витрат часу на проведення експерименту є план спостережень $[NMT]$ або $[NML]$. Він є досить важливим для визначення показників відновлюваних об'єктів. За плану спостережень $[NMT]$ спостереженням підлягають N об'єктів, об'єкти, що відмовили, ремонтують, спостереження припиняють після досягнення наробітку $T(L)$. Статистична інформація про наробіток при цьому плані може бути трьох видів: наробіток i -го об'єкта до першої відмови; наробіток i -го об'єкта до відмови після відновлення працездатності; наробіток до відмови після початку роботи або після ремонту невідоме, але воно або не менше $T(L)$, або менше $T(L)$.

Для розрахунку параметрів закону розподілу до відмови можуть бути використані рівною мірою величини наробітку перших двох видів за повного відновлення всіх робочих параметрів після ремонту. Інформація про наробіток третього виду також може бути частково використана.

Результати класифікації експериментальних даних для випробувань із *періодичним* контролем функціонування подано в табл. 11.3.

Якщо під час випробувань безперервний контроль відсутній, то безпосередньо зафіксувати момент чергової відмови неможливо. Отже, основна особливість експериментальних даних типу 2 полягає в тому, що вони містять тільки умовні та неповні реалізації. Значення умовних реалізацій у цьому випадку визначаються наробітком до моменту контролю, за якого виявлено відмову. Значення неповних реалізацій визначаються безвідмовним наробітком кожного з випробуваних виробів до моменту останнього контролю.

Оскільки під час періодичного контролю безпосередньо зафіксувати момент чергової відмови неможливо, то неможливі, строго кажучи, і стратегії з фіксованим числом відмов. Вони зводяться в цьому разі до стратегій із фіксованим наробітком.

Граничним випадком періодичного контролю є стратегія (план) $\{NUT\}$, за якої контроль функціонування здійснюють тільки перед початком і після закінчення випробувань. У цьому разі випробування складаються з одного міжконтрольного періоду тривалістю T , і, отже, результати випробувань містять умовні й неповні реалізації однакової величини T .

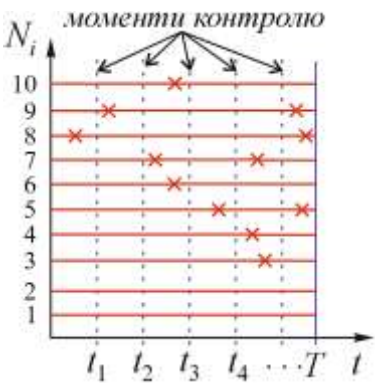
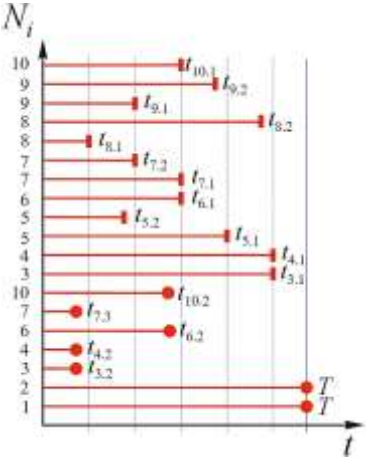
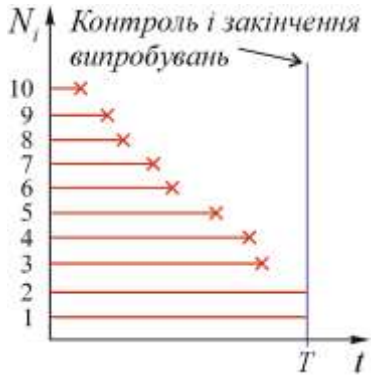
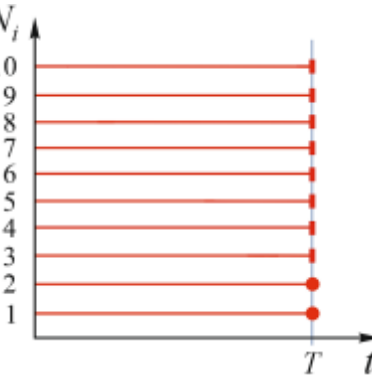
Необхідно зауважити, що комбіновані стратегії $[NU(r,T)]$, $[NR(r,T)]$, $[NM(r,T)]$, не вносять якихось особливостей у характер інформації.

Таблиця 11.3

Типи експериментальних даних під час періодичного контролю функціонування

Умовне позначення плану (стратегії) випробувань (спостережень)	Графічна модель плану випробувань (спостережень)	Діаграма реалізацій	Умовне позначення типу діаграми (тип вибірки)	Стратегії, що дають аналогічні діаграми
1	2	3	4	5
[[NUN]]			2A	[[NMr]] [[1Rr]] ((NUN)) ((NMr))
[[NUT]]			2Б	[[NUTr]] ((NUT))

Закінчення табл. 11.3

1	2	3	4	5
[[NRT]]			2B	[[NRr]] [[NMT]] ((NRr)) ((NMT)) ((NRT)) ((NUr))
{NUT}			2Г	—

Вони дають інформацію того чи іншого типу в межах викладеної класифікації залежно від того, як конкретно завершуються випробування – після досягнення певної кількості відмов або після досягнення певного наробітку.

Нагадаємо, що вище розглянуто експериментальні дані, одержувані під час випробувань на безвідмовність. При цьому статистичний матеріал вирізняється найбільшою різноманітністю. Приблизно такий самий характер мають експериментальні дані, одержувані під час дослідження показників довговічності.

Оцінка показників ремонтопридатності має низку особливостей, що істотно впливають на характер одержуваного статистичного матеріалу.

По-перше, у більшості випадків існує можливість введення штучних невизначеностей, і, оскільки час відновлення зазвичай істотно менший, ніж час безвідмовної роботи, набагато простіше набрати необхідну кількість реалізацій. По-друге, дані про час відновлення зазвичай містять інформацію про момент початку і момент закінчення відновлення, що відповідає випадку безперервного контролю при дослідженні показників безвідмовності. Тому в експериментальних даних відсутні умовні та неповні реалізації. Отже, при оцінці показників ремонтопридатності доводиться мати справу, як правило, з вибіркою типу 1А.

При дослідженні показників збережуваності характерні дані типу 2, оскільки контроль справності виробу в умовах зберігання може бути здійснений, як правило, тільки періодично.

Вибір того чи іншого плану спостережень залежить від багатьох чинників: виду об'єктів, номенклатури показників, що підлягають оцінці за результатами спостережень, умов експлуатації тощо. Важливим також є забезпечення достатньої якості первинної інформації, її об'єктивності, повноти й точності відомостей.

У табл. 11.4 наведено рекомендовані плани випробувань для оцінки основних показників надійності.

Для невідновлюваних об'єктів для оцінки показників надійності використовують плани випробувань:

- для визначення середнього напрацювання до відмови, гамма-відсоткового напрацювання до відмови, інтенсивності відмов – $[NUN]$, $[NUT]$, $[NUR]$, $[NRT]$, $[NRR]$ (причому для скорочення тривалості випробувань застосовують плани $[NRT]$, $[NRR]$;

- для визначення імовірності безвідмовної роботи – $[NUT]$.

Рекомендовані плани випробувань на надійність

Показник надійності, що визначається	Рекомендовані плани випробувань
для невідновлюваних виробів	
Середній наробіток до відмови	$[NUN], [NUr], [NUT], [NRr], [NRT],$ $[NU(r_1, n_1), (r_2, n_2), \dots, (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k],$ $[NU(T_1, n_1), (T_2, n_2), \dots, (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k], [NUz]$
Гамма-відсотковий наробіток до відмови	$[NUr], [NUT], [NRr], [NRT]$
Імовірність безвідмовної роботи	$[NU(r_1, n_1), (r_2, n_2), \dots, (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k],$ $[NU(T_1, n_1), (T_2, n_2), \dots, (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k], [NUz]$
для відновлюваних виробів	
Середній наробіток на відмову	$[NMT], [NMr]$
Середній ресурс (середній строк служби)	$[NUN], [NUr], [NUT],$ $[NU(r_1, n_1), (r_2, n_2), \dots, (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k],$ $[NU(T_1, n_1), (T_2, n_2), \dots, (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k], [NUz]$
Гамма-відсотковий ресурс (гамма-відсотковий строк служби)	$[NUr], [NUT],$ $[NU(r_1, n_1), (r_2, n_2), \dots, (r_{k-1}, n_{k-1}), r_k],$ $[NU(T_1, n_1), (T_2, n_2), \dots, (T_{k-1}, n_{k-1}), T_k], [NUz]$
Середній час відновлення	$[NMr], [NMT]$
Коефіцієнт готовності	$[NMr], [NMT]$
Середній строк збережуваності (гамма-відсотковий строк збережуваності)	$[NUT]$

Щодо відновлюваних (ремонтованих) об'єктів використовують такі плани випробувань:

- для визначення середнього напрацювання на відмову – $[NMT], [NMr]$;
- для визначення середнього ресурсу (терміну служби), гамма-відсоткового ресурсу (терміну служби) – $[NUN], [NUT], [NUr], [NRT], [NRr]$ (причому для скорочення тривалості випробувань застосовують плани $[NRT], [NRr]$, для підвищення точності оцінок показників – $[NUN]$);
- для визначення середнього часу відновлення і коефіцієнта готовності – плани випробувань $[NMT], [NMr]$.

Під час збирання інформації про надійність елементів рухомого складу найбільш придатними є плани $[NUT]$ і $[NRT]$. Це плани з фіксованою тривалістю випробувань, так звані усічені за часом плани. План $[NRT]$ найбільш природний під час організації випробувань на довговічність.

11.4. Планування випробувань на надійність

11.4.1. Розроблення та застосування програм і методик випробувань на надійність

Під час планування випробувань рухомого складу на надійність використовують такі організаційні та організаційно-методичні документи: програму випробувань або програму-методику випробувань для конкретного зразка РС та типові методики випробувань для однорідної групи РС.

Програму та методику випробувань можуть розробляти розробник (виробник) одиниці РС (для випробувань, що виконуються власними силами) або акредитовані ВЦ (для випробувань, виконання яких передано ВЦ).

Програма-методика оформлюється як окремий документ або розділ іншого документа (стандарту, програми випробувань) та затверджується відповідним чином. Розробляють її за відсутності типової методики або при необхідності адаптації до умов конкретної лабораторії та конструктивних особливостей зразка.

Програма випробувань, як правило, містить такі розділи: мету випробувань – визначає цільове призначення та очікувані результати; область застосування – види та категорії випробувань, для яких призначена програма; види та послідовність випробувань – перелік та порядок проведення випробувань, участь співвиконавців; умови проведення – місце, характеристики середовища, режими роботи, умови припинення випробувань, порядок взаємодії сторін; об'єкти випробувань – назва зразків, вимоги до них, правила відбору, транспортування, ідентифікації, супровідна документація; звітність – види, порядок оформлення та передавання документів замовнику й органам, що приймають рішення; розподіл відповідальності – обов'язки виконавців і замовника.

У програмі-методиці випробувань обов'язково зазначають критерії відмов і граничних станів, що встановлюються на основі аналізу технічного завдання, технічних умов, інструкцій та керівництв з експлуатації, обслуговування й ремонту одиниці рухомого складу. Якщо вони відсутні в цих документах, їх визначають у методиці експлуатаційних випробувань на надійність.

У програмі та методиці випробування рухомого складу наводяться такі дані:

- вимоги до вибірки РС, що підлягають випробуванням, із зазначенням типу та серії;
- визначені та/або контрольовані показники надійності випробовуваних одиниць РС, нормативні значення цих показників та методику їх визначення та/або контролю;
- вимоги точності та достовірності результатів випробувань і прийнятні ризики споживача та виробника. Вимоги достовірності задають значенням довірчої імовірності, точності – значенням відносної помилки. Їх значення, як правило, визначають за погодженням між постачальником (виробником) і споживачем. Для контролю надійності РС серійного виробництва допускається проведення випробувань без попереднього планування. У цьому випадку при обробці статистичних даних розраховують фактичні значення достовірності і точності, які повинні бути відповідно не менше заданої довірчої імовірності і не більше заданої відносної помилки;
- обсяг випробувань: обсяг вибірки випробовуваних одиниць РС, тривалість випробувань і спосіб формування вибірки випробовуваних одиниць РС;
- момент початку випробувань;
- маршрути або полігони експлуатації випробовуваних одиниць РС;
- періодичність та місця проведення технічного обслуговування та планових ремонтів випробовуваних одиниць РС;
- рекомендовану форму журналу реєстрації ТО та ремонтів випробовуваних одиниць РС;
- рекомендовану форму акта огляду та виконаних робіт з усунення несправностей випробовуваних одиниць РС, що фіксуються в процесі їх експлуатації під час проведення випробувань для обліку та класифікації відмов.

Кількість зразків та тривалість випробувань визначають з урахуванням: необхідності отримання достовірних даних для оцінки показників надійності; терміну служби основних вузлів і деталей; нормативної напруженості до відмови та заданого рівня довірчої імовірності.

Під час випробувань збирають дані, необхідні для оцінки показників безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності, зокрема: місце виявлення відмови; наслідки відмови (псування, неплановий ремонт, надциклова робота тощо); технічна причина відмови або пошкодження; вид ремонту та спосіб усунення відмови; наробіток до відмови та міжремонтні пробіги (від будівництва, ремонту, попередньої заміни).

Під час оцінки ремонтпридатності експертно визначають: можливість виконання в повному обсязі технічного обслуговування та ре-

монтів, передбачених інструкцією з експлуатації; легкість зняття та взаємозамінність відмовних та (або) зношених складальних одиниць і деталей при їх заміні або при виконанні профілактичних робіт, передбачених інструкцією з технічного обслуговування та ремонту; пристосованість РС до технологічних операцій технічного обслуговування та ремонту з заправки (маслом, паливом, водою, піском), очищення та миття, перевірки та підтягування кріплень, регулювання, змащування, перевірки рівня робочих рідин та мастил; можливість дотримання правил техніки безпеки та протипожежних заходів під час виконання обслуговування та ремонту.

11.4.2. Визначення необхідного обсягу випробувань

Точність оцінювання показників надійності залежить від обсягу спостережень, який визначають за рекомендаціями, наведеними в [6, 7]. Зі збільшенням обсягу вибірки зменшується відносна похибка між точковою оцінкою та істинним невідомим значенням параметра чи показника надійності. У разі використання інтервальних оцінок збільшення кількості спостережень (вибірки) за фіксованої довірчої імовірності приводить до звуження довірчого інтервалу. Тому під час планування випробувань на надійність визначають необхідний обсяг випробувань, який забезпечує обчислення оцінок показників надійності із заданою точністю та достовірністю.

Під заданою точністю мають на увазі граничну відносну похибку ξ в оцінці показника надійності, під заданою достовірністю – довірчу імовірність q .

Під обсягом випробувань розуміють для:

- плану $[NUN]$ – кількість об'єктів випробувань N ;
- планів $[NUr]$, $[NMr]$ і $[NRr]$ – кількість об'єктів випробувань N і кількість відмов (граничних станів) r ;
- планів $[NUT]$, $[NMT]$ і $[NRT]$ – кількість об'єктів випробувань N і тривалість випробувань T .

Вихідними даними для розрахунку обсягу випробувань є:

- довірча імовірність q інтервальної оцінки відповідного показника надійності;
- гранична відносна похибка ξ оцінки відповідного показника надійності;

– коефіцієнт варіації v розподілу випадкової величини (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення, терміну збережуваності);

– вид закону розподілу випадкової величини (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення, терміну збережуваності).

Гранична відносна похибка ξ оцінки відповідного показника надійності

$$\xi = \left\{ \frac{\hat{R} - \underline{R}}{\hat{R}}; \frac{\bar{R} - \hat{R}}{\hat{R}} \right\}, \quad (11.6)$$

де $\hat{R}$ – оцінка показника надійності R ;

$\underline{R}$ – нижня довірча границя показника надійності R ;

$\bar{R}$ – верхня довірча границя показника надійності R .

Звичайно граничну відносну похибку (відносну похибку) ξ обирають із ряду: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20, довірчу імовірність q – із ряду: 0,80; 0,90; 0,95; 0,99.

Рекомендуються такі поєднання значень ξ та q :

– для складових частин виробу, що впливають на безпеку, – $\xi = 0,05$; $q = 0,95$; 0,99;

– базових складових частин виробу – $\xi = 0,10$; 0,15; $q = 0,90$; 0,95;

– деталей, що обумовлюють зовнішній вигляд виробу, його комфортність, – $\xi = 0,15$; 0,20; $q = 0,80$; 0,90;

– виробів масового та серійного виробництва – $\xi = 0,10$; $q = 0,90$.

Розглянемо порядок визначення обсягу випробувань для **плану [NUr]**. Під обсягом випробувань для цього плану розуміють як кількість об'єктів N так і кількість відмов (граничних станів) r випробуваних об'єктів.

За невідомого закону розподілу випадкової величини обсяг вибірки N для оцінки гамма-відсоткових показників надійності або імовірності безвідмовної роботи під час використання плану [NUr] визначають за таблицею Г.1 наведеною у [6].

Вихідними даними для розрахунку є: довірча імовірність q ; нормована імовірність $\gamma/100$ чи передбачуване значення $P(t)$; встановлена кількість відмов (граничних станів) r .

За невідомого закону розподілу випадкової величини кількість відмов (граничних станів) r для оцінки гамма-відсоткових показників надійності чи імовірності безвідмовної роботи визначають також за табл. Г.1 [6], припускаючи, що кількість випробуваних об'єктів N задано.

За відомого закону розподілу випадкової величини вихідними даними для розрахунку обсягу випробувань під час оцінки середніх показників надійності (середнього наробітку до відмови, середнього ресурсу, терміну служби, терміну збережуваності, тривалості відновлення) є: довірна імовірність q ; відносна похибка ξ ; коефіцієнт варіації v (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення) та, відповідно, вид закону розподілу випадкової величини (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення).

Кількість відмов (граничних станів) r під час оцінювання середніх показників надійності визначається за формулами:

– для експоненційного розподілу

$$r = \frac{\xi + 1}{2} \chi_{1-q}^2(2N), \quad (11.7)$$

де χ_{1-q}^2 – квантиль хи-квадрат розподілу з кількістю ступенів вільності $2N$, що відповідає імовірності $1-q$;

– для дифузійних DM-розподілу та DN-розподілу

$$r = \left(\frac{u_q v}{\xi} \right)^2 \cdot \frac{(1 + \sqrt{1 + \xi^2})}{2}, \quad (11.8)$$

де u_q – квантиль нормального розподілу, що відповідає імовірності q ;

– для логарифмічно нормального розподілу

$$r = \left(\frac{u_q}{\xi} \right)^2 \cdot \ln(v^2 + 1) \cdot \left[1 + \frac{\ln(v^2 + 1)}{2} \right]; \quad (11.9)$$

– для розподілу Вейбулла

$$r = \frac{(\xi+1)^b}{2} \chi_{1-q}^2(2N), \quad (11.10)$$

де b – параметр розподілу Вейбула.

Обсяг вибірки N для оцінки середніх показників надійності, припустивши, що задана відносна тривалість випробувань $\chi = T_{\text{и}}/T_{\text{ср}}$ ($T_{\text{и}}$ – тривалість випробувань, $T_{\text{ср}}$ – очікуване значення середнього наробітку до відмови), визначають за формулами:

– для експоненційного розподілу

$$N = \frac{e^{\chi}(r-0,5)+0,5}{e^{\chi}}; \quad (11.11)$$

– для DM-розподілу

$$N = r / \Phi \left[\frac{\chi(1+v^2/2)-1}{v\sqrt{\chi(1+v^2/2)}} \right]; \quad (11.12)$$

– для DN-розподілу

$$N = r / \left[\Phi \left(\frac{\chi-1}{v\sqrt{\chi}} \right) + e^{2v^2} \Phi \left(-\frac{\chi+1}{v\sqrt{\chi}} \right) \right]; \quad (11.13)$$

– для логарифмічно нормального розподілу

$$N = r / \Phi \left[\ln \chi / \sqrt{\ln(v^2+1)} \right]; \quad (11.14)$$

– для розподілу Вейбулла

$$N = \left\{ \frac{\exp \left[\chi \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right) \right]^b \cdot (r-0,5) + 0,5}{\exp \left[\chi \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right) \right]^b - 1} \right\}, \quad (11.15)$$

де $\Phi(\dots)$ – функція нормального розподілу (нормованого);
 $\Gamma(\dots)$ – гамма-функція.

Кількість відмов (граничних станів) r для оцінки гамма-відсоткових показників надійності за регламентованої імовірності $\gamma/100$ визначають за формулами:

– для експоненційного розподілу

$$r = (u_q K_\gamma / \xi)^2, \quad (11.16)$$

$$K_\gamma = \frac{\sqrt{100 / \gamma - 1}}{\ln(100 / \gamma)}; \quad (11.17)$$

– для DM-розподілу

$$r = \left(\frac{u_q v}{\xi} \right)^2 \cdot \frac{(1 + \sqrt{1 + \xi^2}) K_{DM}}{2(1 - \gamma/100)}, \quad (11.18)$$

де $K_{DM} = DM(T_{cp}; \mu, v)$ – імовірність, що відповідає наробітку T_{cp} ;

– для DN-розподілу

$$r = \left(\frac{u_q v}{\xi} \right)^2 \cdot \frac{(1 + \sqrt{1 + \xi^2}) K_{DN}}{2(1 - \gamma/100)}, \quad (11.19)$$

де $K_{DN} = DN(T_{cp}; \mu, v)$ – імовірність, що відповідає наробітку T_{cp} ;

– для логарифмічно нормального розподілу

$$r = \left(\frac{u_q K_\gamma}{\xi} \right)^2 \ln(v^2 + 1), \quad (11.20)$$

$$K_\gamma = \frac{1}{f_0(u_\gamma)} \sqrt{(1 - \gamma/100) \gamma / 100}, \quad (11.21)$$

де $f_0(u_\gamma)$ – густина нормованого нормального розподілу, що відповідає квантилю нормального розподілу імовірності γ .

– для розподілу Вейбулла

$$r = \left(\frac{u_q K_\gamma}{\xi b} \right)^2, \quad (11.22)$$

$$K_\gamma = \frac{\sqrt{100/\gamma - 1}}{\ln(100/\gamma)}. \quad (11.23)$$

Якщо немає обмежень на тривалість випробувань, обсяг вибірки N для оцінки гамма-відсоткових показників визначається за умовою

$$r < N \leq r/(1 - \gamma/100). \quad (11.24)$$

В разі якщо задана відносна тривалість випробувань χ , обсяг вибірки N для оцінки гамма-відсоткових показників надійності визначається за (11.11–11.15).

Визначення обсягу випробувань для плану [NUN]. За відомого виду закону розподілу випадкової величини вихідними даними для розрахунку обсягу випробувань під час оцінки середніх показників надійності (середнього наробітку до відмови, середнього ресурсу, терміну служби, терміну збережуваності, тривалості відновлення) є: довірна імовірність q ; відносна похибка ξ ; коефіцієнт варіації v (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення); вид закону розподілу випадкової величини (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення).

Якщо вид закону розподілу випадкової величини відомий, то обсяг випробувань N визначають за таблицями, що наведені у додатках [6]. Таблиці дозволяють визначити кількість об'єктів випробувань N для відомих закону розподілу випадкової величини і значень ξ , q і v .

Якщо за результатами випробувань отримано коефіцієнт варіації більше заданого, то кількість об'єктів випробувань перераховують для знайденого коефіцієнта варіації v і випробування продовжують.

Якщо вид закону розподілу випадкової величини невідомий, обсяг випробувань знаходиться в припущенні, що випадкова величина має

розподіл Вейбулла або логарифмічно нормальний. В якості остаточного обсягу випробувань приймають максимальне значення.

Приклад 11.3. Для плану випробувань $[NUN]$ визначити кількість об'єктів випробувань N , щоб із довірчою імовірністю $q = 0,95$ гранична відносна похибка ξ у визначенні середнього наробітку до відмови не перевищувала 0,10. Припускається, що наробіток до відмови має розподіл Вейбулла з коефіцієнтом варіації $v = 0,40$.

Розв'язання. За таблицею М.1 [6] для розподілу Вейбулла і $\xi = 0,10$; $q = 0,95$; $v = 0,40$ знаходимо $N = 50$.

За результатами випробувань 50 об'єктів отримано коефіцієнт варіації $\hat{v}_1 = 0,50$. Оскільки $\hat{v}_1 > v$, то визначаємо додаткове кількість об'єктів, які необхідно поставити на випробування. Для $\xi = 0,10$; $q = 0,95$ і $v = 0,50$ за таблицею М.1 [6] находимо $N = 80$.

За результатами випробувань 80 об'єктів отримано коефіцієнт варіації $\hat{v}_2 = 0,45$. Оскільки $\hat{v}_2 < 0,50$, то перерахунок не потрібен, і випробування завершуються.

Приклад 11.4. Для плану випробувань $[NUN]$ визначити кількість об'єктів випробувань N , щоб із довірчою імовірністю $q = 0,80$ гранична відносна похибка ξ у визначенні середнього наробітку до відмови не перевищувала 0,20. Передбачуваний коефіцієнт варіації $v = 0,50$. Закон розподілу наробітку до відмови невідомий.

Розв'язання. За таблицями Л.1 та М.1 [6] знаходимо кількість об'єктів випробувань для розподілів логарифмічно нормального та Вейбулла. Отримуємо відповідно $N = 4$ та $N = 8$. Приймаємо як остаточне значення обсяг вибірки $N = 8$.

Як відмічалось вище, для оцінювання надійності одиниць рухомого складу план випробувань $[NMT]$ є найдоцільнішим, оскільки враховує їхню природу як відновлюваних технічних об'єктів. За цим планом випробування здійснюються одночасно на N об'єктах до встановленого напруження T , при цьому об'єкти, що відмовили, відновлюють і продовжують випробування, що забезпечує моделювання реальних умов експлуатації. Такий підхід дає змогу отримати достовірну інформацію щодо показників безвідмовності та ремонтпридатності, зокрема середнього наробітку між відмовами, інтенсивності відмов, середнього часу відновлення і коефіцієнта готовності. План $[NMT]$ є ефективним за обмеженої кількості дослідних зразків (3–7 одиниць), забезпечує

достатній обсяг статистичних даних та комплексне оцінювання експлуатаційних властивостей рухомого складу.

Для оцінки середніх значень показників надійності (середнього наробітку до відмови, середнього ресурсу, терміну служби, терміну збережуваності, тривалості відновлення) вихідними даними для планів $[NMT]$ та $[NRT]$ є: довірна імовірність q ; відносна похибка ξ ; коефіцієнт варіації v (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення); вид закону розподілу випадкової величини (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, тривалості відновлення).

Прогнозована кількість відмов r визначається за формулами (11.7–11.10), а обсяг вибірки N або відносна тривалість випробувань h розраховується за формулою $h = r/N$.

Якщо за результатами випробувань N об'єктів за час T одержана кількість відмов менша за прогнозовану, то випробування продовжують до виникнення r відмов або знижують вимоги до точності та (або) вірогідності оцінки показника [6].

В умовах підконтрольної експлуатації певної кількості одиниць рухомого складу N тривалість спостережень за планом $[NMT]$ можна визначати за формулою:

$$T = \frac{\chi R}{N}, \quad (11.25)$$

де χ – коефіцієнт, який вибирається залежно від відносної похибки ξ та довірчої імовірності q за табл. 11.5;

R – нормативне значення показника надійності.

Таблиця 11.5

Значення коефіцієнту χ

Значення відносної похибки ξ	Значення коефіцієнта χ за значення довірчої імовірності q			
	0,8	0,9	0,95	0,99
0,05	331	684	1052	2625
0,1	88	217	346	714
0,15	56	114	170	358
0,2	29	59	116	232

Отриману за формулою (11.25) величину T округлюють до цілого числа у бік збільшення.

Приклад 11.5. Планується встановити на підконтрольну експлуатацію один дизель-поїзд. Відповідно до технічного завдання значення середнього наробітку на відмову першого роду становить $0,1 \cdot 10^5$ км. Визначити тривалість проведення експлуатаційних випробувань з відносною похибкою $\xi = 0,2$ та довірчої імовірності $q = 0,8$.

Розв'язання. За табл. 11.5 для значень $\xi = 0,2$ та $q = 0,8$ коефіцієнт $\chi = 29$. Тоді за формулою (11.25)

$$T = \frac{29 \cdot 0,1 \cdot 10^5}{1} = 290\,000 \text{ км.}$$

Якщо розрахункова сумарна напрацювання T не перевищує наперед визначеного або фактично досягнутого терміну спостережень, то отриману оцінку показника надійності можна вважати достатньо точною та достовірною для заданих значень ξ і q .

11.5. Вимоги до інформації про надійність, методи її збирання та аналізу

11.5.1. Загальні вимоги до інформації

На основі аналізу кількісних показників безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збереженості розробляються заходи для підвищення надійності одиниць рухомого складу та елементів їх конструкції. Об'єктивність і достовірність цих показників повністю залежить від обсягу, об'єктивності та достовірності вихідної статистичної інформації, що отримується в конкретних умовах. Збирання та обробка інформації про надійність рухомого складу необхідні для:

- визначення та аналізу кількісних показників надійності РС та їх складальних одиниць;
- виявлення конструктивних і технологічних недоліків вузлів, агрегатів, деталей, що знижують і обмежують надійність РС;
- виявлення закономірностей виникнення відмов і впливу умов експлуатації та режимів роботи на рівень надійності;

- коригування нормованих показників надійності;
- виявлення недоліків експлуатації одиниць рухомого складу, вдосконалення системи їх технічного обслуговування та ремонту, оптимізації норм витрати запасних частин і матеріалів для ремонту вузлів і деталей, що вийшли з ладу;
- розробки конструктивних і технологічних заходів для підвищення надійності лімітуючих вузлів і деталей.

Тому до вихідної статистичної інформації висуваються відповідні вимоги.

Перш за все, вихідна статистична інформація повинна бути *достовірною*. Оскільки поява відмови – явище випадкове, то внесення суб'єктивних похибок, пов'язаних з недостатньою кваліфікацією або недобросовісністю працівників, не дозволить виявити будь-які закономірності в появі тієї чи іншої відмови, або обробка такої інформації може призвести до неправильних висновків про фактичну надійність РС або складальних одиниць і деталей. Тому для формування масиву первинної інформації вдаються до комісійного методу оцінки несправностей зі складанням відповідних документів (актів).

Для обґрунтування висновків і рішень інформація повинна бути *повною*. При аналізі надійності РС інформацію збирають як за відмовами в міжремонтний період (неплановий ремонт для відновлення працездатності елементів, що відмовили), так і за відмовами, виявленими на планових ремонтах і викликали збільшення обсягу робіт або простою (наявність понадпланового обсягу ремонту). Строго кажучи, це неповна інформація, оскільки вона не враховує планову заміну деталей і складальних одиниць. Оскільки сам момент планового ремонту для деяких елементів є випадковим, певним вольовим способом, то і заміна тієї чи іншої деталі або складальної одиниці на РС може бути не підкріплена якимись об'єктивними причинами. У цих випадках значна частина інформації в розрахунках не враховується (тобто втрачається), що вносить похибки у визначення відповідних показників і не дозволяє впевнено прогнозувати надійність.

В умовах інтенсивних перевезень особливого значення набуває своєчасне забезпечення розпорядчих органів АТ «Укрзалізниця» на різних рівнях *оперативною* інформацією про відмови з їх якісними та кількісними характеристиками. У РС робота складальних одиниць взаємопов'язана. Тому несвоєчасне виявлення відмови навіть якоїсь, на перший погляд незначної, деталі може призвести до тяжких наслідків і спричинити відмову всієї одиниці РС. Це особливо важливо для інформації про деталі та складальні одиниці, що безпосередньо забезпе-

чують безпеку руху поїздів. Разом з тим інформацію потрібно безперервно і постійно накопичувати для обґрунтування обсягів робіт, що виконуються при планових ремонтах, а також для оптимізації всієї системи ремонтно-експлуатаційного обслуговування РС.

Щоб інформація була *короткою, інформативно-ємною і легко оброблялася*, необхідна сучасна система кодування, передачі та обробки її, для автоматизації, обліку та звітності. У коротких формах обліку даних про відмови потрібно відображати чіткі та достатні відомості для виявлення причин і наслідків відмов, зокрема: паспортні дані одиниці РС; депо і дороги приписки; режими експлуатації; дати всіх планових і непланових ремонтів і обслуговувань; характер пошкодження (відмови) і можливі причини; напрацювання до відмови від побудови і від усіх видів ремонту і технічного обслуговування.

Система передачі інформації потребує *зворотного зв'язку*. Накопичену в депо інформацію потрібно в згрупованому вигляді передавати в інформаційно-обчислювальні центри (ІОЦ) залізниць для підсумовування та аналізу, щоб керівники служб та депо спільно розробляли оперативні заходи, направлені на якнайшвидше виявлення та усунення причин, що викликають ті чи інші відмови або несправності. Оброблену в ІОЦ інформацію потрібно передавати в «Головний інформаційно-обчислювальний центр» (ГІОЦ) АТ «Укрзалізниця» і заводи-виробники, щоб спільними зусиллями підвищити надійність лімітуючих вузлів і деталей РС.

Порядок збору інформації про надійність об'єктів, форми обліку та накопичення даних про несправності та відмови визначаються галузевими стандартами та наказами АТ «Укрзалізниця».

Відповідно до цих документів передбачені такі форми первинних даних: облік експлуатаційної інформації про надійність (первинні форми обліку); збір інформації про відмови; запис результатів аналізу надійності.

АТ «Укрзалізниця» встановлює єдині для всіх залізниць та депо форми зазначених документів і методики їх обробки. У формах-накопичувачах потрібно передбачати можливість кодування даних, запису на електронних носіях для подальшої обробки на ЕОМ.

Первинні форми обліку призначені для запису несистематизованої інформації в депо. Такими формами є журнали обліку: напрацювань (пробігу), несправностей і відмов, а також технічного обслуговування і ремонту РС.

Форми-накопичувачі для запису систематизованої за необхідними ознаками інформації заповнюються поданою первинною документа-

цією спеціально виділеним і навченим персоналом. До таких форм відносяться карти-накопичувачі напрацювань, пошкоджень і відмов РС та їх вузлів, деталей; карти-накопичувачі відомостей про технічне обслуговування і ремонт РС.

11.5.2. Форми обліку надійності локомотивів

За роботою локомотива в процесі експлуатації спостерігає в основному машиніст, який зобов'язаний про результати кожної поїздки робити в журналі запис технічного стану локомотива (форма ТУ-152). Оскільки часто в них не вказуються причини і наслідки відмов, то більш докладні відомості про відмови, їх наслідки і способи відновлення заносяться в настільний журнал (форма ТУ-1, частина І). Якщо відмова сталася в шляху прямування та призвела до псування локомотива, то відповідно до «Інструкції про порядок розслідування псування» в депо складається технічний акт (форма ТЕУ-21).

Можливі відмови, пов'язані з підвищеним зносом вузлів і деталей, можуть бути виявлені в пунктах технічного огляду, де екіпіруються локомотиви і зовні оглядаються найважливіші складальні одиниці. Для усунення несправностей можуть замінюватися деталі і вузли. Про характер і причини усунених несправностей майстер (або бригадир) пункту технічного огляду робить запис у журналі ПТО і повідомляє ці відомості в депо приписки. Відомості про відмову обладнання, що призвела до позапланового ремонту, заносяться в журнал форми ТУ-29.

При планових ремонтах у всіх випадках, коли виникає необхідність дострокової заміни або регулювання агрегату, складальної одиниці або деталі, технолог депо реєструє відомості про додаткові ремонти в журналі форми ТУ-28. Крім того, при планових ремонтах профілактично усуваються відмови, пов'язані з підвищеним зносом. Для цього потрібні додаткові витрати часу і коштів. При цьому в журналі планових ремонтів записується вид можливої відмови, причини її виникнення, пробіг локомотива на даний момент від виконаного раніше ремонту.

Результати контрольних вимірювань реєструються в книгах обліку та журналах форми ТУ-28. Наприклад, при заміні коліс но-моторних блоків і ревізії букс оглядають колісну пару. При цьому вимірюються прокат, товщина гребеня і бандажа, і результати вимірів заносяться в журнал форми ТУ-18, який є основним документом для реєстрації контрольних вимірів бандажів колісних пар, а також в «Книгу пробігів і реєстрації ремонтів локомотивів» (форми ТУ-27 і ТУ-17) .

У депо ведеться загальний журнал обліку пошкоджень за даними експлуатації локомотивного парку протягом місяця. На підставі цього журналу один раз на квартал для служби локомотивного господарства залізниці складається звіт «Відомість непланових ремонтів» (форма ТО-15), де відображається робота обладнання локомотивів, а також фіксуються несправності за системами або групами агрегатів в цілому. Формою ТО-15 не передбачається групування відомостей про відмови обладнання локомотивів окремих серій.

На додаток до перерахованих нормативних документів останнім часом реалізується типова задача, пов'язана з аналізом пошкоджень і позапланових ремонтів РС, в рамках АСК ВП УЗ. При цьому використовується форма ТУ-29ВЦ, на підставі якої в ІОЦ обробляються дані і видаються вихідні таблиці, що містять упорядковану інформацію про псування і непланові ремонти (але без урахування заміни деталей на планових ремонтах).

Вихідні дані накопичуються і усереднюються протягом часу, що значно перевищує можливі затримки при передачі та обробці цієї інформації. Однак слід мати на увазі, що в процесі накопичення статистичних даних може виникнути необхідність прийняття оперативних рішень. Так, наприклад, у міру накопичення відомостей про сезонні відмови може знадобитися прийняття термінових заходів щодо їх попередження. Отже, в системі збору інформації про відмови потрібно передбачати *оперативність її передачі та аналізу, поряд з постійним накопиченням даних*.

Оскільки джерелами інформації є різні журнали та форми обліку в локомотивних депо, то об'єктивність інформації, що формується на основі первинного обліку, можна розглядати з двох боків. З одного боку, забезпечення достовірності може ґрунтуватися лише на особистій відповідальності за доручену ділянку роботи. З іншого боку, слід контролювати достовірність інформації на основі імовірнісних характеристик виникнення помилок на етапах заготівлі первинних носіїв, передачі та обробки інформації.

Друга проблема під час збирання інформації – концентрація інформації в одному місці при виконанні різних видів ремонту в різних депо. Технологією збору та передачі інформації потрібно забезпечити найбільш повний збір інформації, тобто всю інформацію про відмови, ремонти або заміни деталей і вузлів локомотива потрібно зафіксувати і передати на ЕОМ в депо приписки локомотива.

Використання розроблених класифікаторів відмов деталей локомотивів, що містять величезний обсяг інформації, передбачає ручний характер заповнення вихідних документів, що, природно, ускладнює щоденне застосування. Тому для фіксації первинної інформації про відмови деталей і вузлів локомотива при заході на планові та непланові види ремонтів розроблені переносні автономні електронні пристрої. Для кожної серії локомотива розробляється спеціальний алгоритм фіксації несправності без знання коду несправності. Фрагмент такого алгоритму наведено на рис. 11.2, де заштриховані позиції вказують шлях проходження алгоритму класифікації відмови 6-го циліндра дизеля через знос. Сформований код має вигляд 1.1.1.6.1.3, в якому міститься інформація: дизель (1) > циліндропоршнева група (1) > циліндр (1) > шостий (6) > знос (1) > заміна новим (3), що виключає необхідність роботи з класифікаторами.

Для забезпечення більшої інформативності в код внесено позицію, що надає інформацію про ремонт деталі, яка вийшла з ладу (1 – відремонтована; 2 – заміна на відремонтовану; 3 – заміна на нову). В результаті фіксації ряду несправностей, виявлених на локомотиві, в пристрої накопичується відповідна кількість кодів, об'єднаних між собою загальною інформацією: дата; номер локомотива; показання швидкостеміра; вид ремонту; час заходу для ремонту; час виходу з ремонту; трудомісткість ремонту; витрати на відновлення. Зібрана інформація передається на ЕОМ або безпосередньо підключенням електронного пристрою до порту ЕОМ, або по локальній лінії. Такі пристрої необхідно розмістити там, де виконуються технічне обслуговування і ремонти локомотивів. Сформований масив кодів інформації

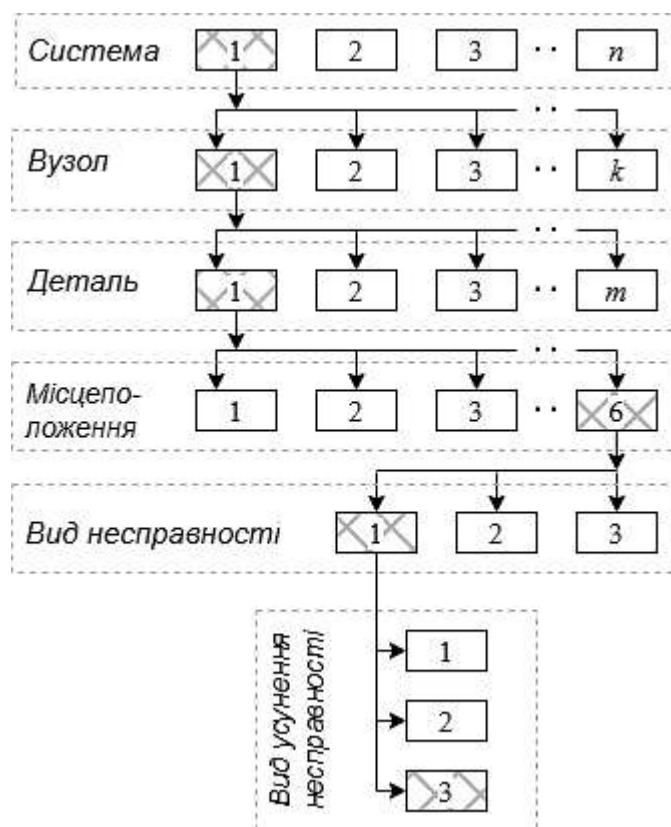


Рис. 11.2. Приклад алгоритму фіксації відмови

передається по лініях зв'язку на ЕОМ в депо приписки локомотива. З часом по серії локомотивів накопичується база первинної інформації про відмови вузлів і деталей локомотивів приписного парку депо.

На рис. 11.3 представлена схема передачі інформації в депо приписки локомотива для накопичення, обробки та прийняття рішення про постановку його в ремонт відповідного обсягу.

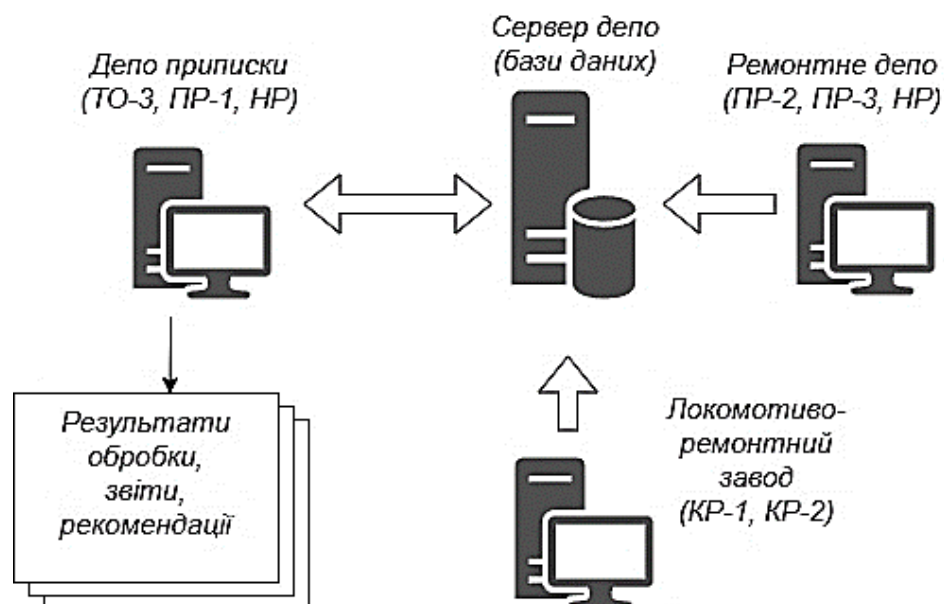


Рис. 11.3. Схема потоків інформації про надійність

Накопичена база даних є первинною для розрахунку показників надійності кожної серії локомотивів конкретного депо, вона може служити для оптимізації ремонтного циклу та оптимізації проведення діагностування.

Основною складністю у формуванні та відстеженні динаміки зміни контрольованих параметрів у процесі експлуатації є процес формування бази даних по кожному локомотиву з урахуванням характеристик складових його складальних одиниць обладнання.

Для накопичення та обробки вихідної інформації доцільно сформувати електронний паспорт локомотива з вмістом максимально можливого обсягу інформації по локомотиву в цілому і по його елементах.

Наприклад, в системі електронної паспортизації передбачений контроль параметрів кожного електричного апарату та електричної машини у складі одиниці тягового рухомого складу. До неї входять:

- пристрої для вимірювання після ремонтів необхідних параметрів складових частин одиниць тягового складу зі стандартним виходом на інтерфейс;
- закріплені на електричних апаратах і машинах мініатюрні енергонезалежні пристрої зберігання інформації про виміряні параметри;
- спеціальний адаптер для запису та зчитування інформації із зазначених енергонезалежних пристроїв;
- комплекс програм для роботи з адаптером та мініатюрними енергонезалежними пристроями.

Система функціонує наступним чином. Після зняття з локомотива та проведеного ремонту електричний апарат або електрична машина тестується діагностичним обладнанням. Якщо виміряні параметри відповідають діапазону допустимих значень, отримані дані записуються в енергонезалежний пристрій пам'яті відповідним програмним забезпеченням через підключений до послідовного порту адаптер. Цей пристрій є носієм паспортних параметрів і закріплюється на об'єкті, що ремонтується. Таким чином створюється електронний паспорт кожного апарату і машини.

Далі, при установці апаратури на локомотив з кожного апарату і електричної машини енергонезалежний пристрій знімається, зчитується збережений там «електронний» паспорт і записується в файл, який є паспортом для локомотива в цілому.

У проектах подальшого розвитку АСК ВП УЗ закладені принципи і структура системи управління всіма процесами локомотивного господарства, в тому числі і управління надійністю локомотивів на основі збору, накопичення, аналізу даних про відмови, несправності, заміни вузлів і деталей, а також про значення діагностичних параметрів технічного стану обладнання локомотивів. Важливим моментом цієї системи є інформаційне забезпечення вироблення керуючих впливів і автоматизація процесу збору, обробки та аналізу інформації за допомогою ЕОМ.

11.5.3. Якісний аналіз інформації про надійність

Отриманий в результаті випробувань перелік порушень функціонування являє собою сукупність ситуацій, дуже різномірних як за причинами виникнення, так і за їх впливом на ті чи інші показники надійності. Зокрема, наприклад, в умовах комбінованих випробувань дослідних зразків складних виробів статистична інформація може бути значною мірою засмічена фактами порушення працездатності, що не мають від-

ношення до оцінюваного (або контрольованого) показника надійності. Тому обробка результатів спостережень при будь-якій процедурі – визначальній або контрольній – повинна включати в якості першого обов’язкового етапу етап попереднього якісного аналізу. Основними завданнями якісного аналізу є об’єднання і класифікація інформації.

Об’єднання інформації. Важливим засобом збільшення обсягу статистичної інформації є об’єднання відомостей про відмови і напрацювання однотипних виробів, отриманих на різних етапах випробувань або на випробуваннях, що проводяться в різних умовах. Однак об’єднання статистичної інформації поряд з формальним збільшенням обсягу може значно погіршити якість інформації, її однорідність. Тому можливість і доцільність об’єднання інформації повинні бути обґрунтовані інженерними міркуваннями. У кожному конкретному випадку перед випробуваннями рекомендується планувати можливість об’єднання статистичної інформації, а після випробувань досліджувати отриману інформацію на предмет відсутності протипоказань до об’єднання.

В умовах обмеженого обсягу статистичної інформації кількісна оцінка її однорідності за будь-яким статистичним критерієм не може бути достатньо переконливою, тому основними засобами забезпечення достовірності експериментальних оцінок є інженерний аналіз умов виготовлення та випробувань виробів і відповідна класифікація інформації про відмови.

Класифікація інформації. Залежно від цілей аналізу статистичну інформацію можна класифікувати за різними ознаками – за причинами, місцем і способом відновлення, характером впливу на працездатність виробу, відношенням до конкретних показників надійності тощо. З точки зору завдань експериментальної оцінки надійності найбільш важливими вважаються дві групи класифікації відмов – за причинами та стосовно оцінюваних показників надійності.

Класифікація відмов за *причинами виникнення*. Групи, на які розділяються відмови за причинами виникнення, визначаються в основному тим, які заходи можуть сприяти поліпшенню якості виробів.

Виділяються такі групи відмов:

- *конструкційні*, що визначаються якістю розробки виробу;
- *технологічні*, що визначаються якістю технологічної документації та технологічного оснащення виробництва;
- *виробничі*, зумовлені порушеннями вимог технології при виготовленні;
- *експлуатаційні*, зумовлені експлуатацією виробу в режимах і умовах, не передбачених технічною документацією;

– *ремонтні*, зумовлені порушенням технології ремонту РС.

Для програмно-керованих виробів, крім перерахованих, можуть бути виділені ще дві групи порушень функціонування, які зовні проявляються як відмови: алгоритмічні та програмні.

Класифікація відмов стосовно *оцінюваних показників надійності*. При класифікації відмов стосовно оцінюваних показників надійності всі відмови поділяються на «враховувані» і «невраховувані». Враховуваними вважають тільки відмови, що сталися з вини виробника. До неврахованих відносять відмови:

- залежні, що виникли одночасно з незалежними;
- спричинені впливом зовнішніх факторів, не передбачених у технічній документації на виріб;
- спричинені порушеннями обслуговуючим персоналом інструкцій з експлуатації, технічного обслуговування та ремонту;
- відмови дослідних зразків, що усуваються в процесі конструкційних доопрацювань (що виконуються в період випробувань), ефективність яких очевидна або підтверджена виробником експериментально;
- відмови, пов'язані з проведенням спеціальних експериментів;
- відмови, що не впливають на конкретний оцінюваний показник.

Схема, що пояснює принцип класифікації відмов по відношенню до показників надійності, представлена на рис. 11.4.

Характерні помилки при організації випробувань, збиранні та первинній обробці статистичної інформації. Загальні правила проведення випробувань, що містять чіткі та докладні інструкції з усіх питань випробувань, є необхідною передумовою отримання достовірних даних про надійність. Нижче наведено приклади деяких характерних помилок.

Відхилення від встановлених правил ремонту. Ця помилка проявляється найчастіше у використанні інструментів, приладдя та ремонтного обладнання, що не призначені для відновлюваного виробу, а також у порушенні встановленого документацією порядку відновлення виробу.

Наприклад, замість заміни несправного змінного елемента (вузла) запасним, проводять його ремонт безпосередньо на місці. Відновлення працездатності виробу при цьому істотно ускладнюється і затягується. У зв'язку з цим необхідно підкреслити, що при оцінці показників ремонтпридатності вся стратегія ремонту, запропонована розробником в експлуатаційній документації разом з ремонтним обладнанням і комплектом ЗІП, є таким же об'єктом випробувань, як і сам виріб.



Рис. 11.4. Класифікації відмов по відношенню до показників надійності

Відхилення від встановлених режимів регламентних робіт. Можливі відхилення в бік як скорочення, так і збільшення обсягів регламентних робіт по відношенню до передбачених документацією. Наприклад, частина передбачених регламентних робіт може не проводитися через брак часу або відсутність відповідного персоналу. Отримані за цих умов результати можуть значно відрізнятися від тих, які були б отримані при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

Помилки при класифікації відмов найбільш поширені. Не враховуючи випадків спотворень, обумовлених суто відомчими інтересами, помилки класифікації в основному є наслідком неправильної інтерпретації тих чи інших класифікаційних ознак в конкретній ситуації. Наприклад, буває важко відрізнити випадкове порушення інструкції обслуговуючим персоналом від природної помилки, обумовленої ерго-

номічною недосконалістю виробу або низькою якістю експлуатаційної документації.

Наступна характерна помилка: до групи неврахованих заносять всі відмови, виявлені під час регламентних робіт, мотивуючи це тим, що регламентні роботи призначені для виявлення прихованих відмов. При цьому в оцінках надійності не враховуються і відмови, що накопилися в міжрегламентний період, що значно завищує всі оцінки. До неврахованих в даному випадку можна відносити лише ті ситуації, коли при регламентних роботах виявляються і усуваються «потенційні» відмови спеціальними методами прогнозування відмов. Помилкою класифікації є і виключення з розрахунку відмов, що самоусуваються при пошуку і ремонті.

Нарешті, в практиці експлуатації рухомого складу часто трапляється методична помилка, коли до обліковуваних відмов зараховують події, що не мають безпосереднього відношення до оцінюваного показника надійності об'єкта. До таких подій, зокрема, належать випадки зупинки локомотива або поїзда, спричинені помилковими діями локомотивної бригади, порушенням алгоритмів роботи систем керування, некоректними командами автоматизованих систем керування рухом, а також впливом зовнішніх факторів, не пов'язаних з технічним станом самого рухомого складу. Прикладами можуть бути автоматичне відключення тяги через некоректну роботу програмного забезпечення бортової системи керування, зупинка поїзда внаслідок помилкового спрацювання пристроїв автоблокування або локомотивної сигналізації, а також обмеження руху через незадовільний стан колії чи контактної мережі.

Формально такі події проявляються як порушення нормальної роботи рухомого складу, однак за своєю суттю вони не є відмовами його елементів і не повинні враховуватися під час оцінювання показників надійності локомотивів чи вагонів.

Слід також враховувати, що віднесення тієї чи іншої події до обліковуваних відмов залежить від того, який саме показник надійності оцінюється. Так, відмова елемента рухомого складу, що виникла за умов експлуатації, які не відповідають вимогам технічних умов, як правило, не враховується під час оцінювання показників безвідмовності. Це зумовлено тим, що показники безвідмовності характеризують здатність об'єкта зберігати працездатний стан саме в установлених і нормативно допустимих режимах роботи.

Водночас така відмова може бути врахована під час оцінювання показників ремонтпридатності рухомого складу, якщо процес відновлення працездатного стану в цьому випадку здійснюється тими сами-

ми способами, що й при відмовах, які виникають у номінальних умовах експлуатації.

Зокрема, якщо при відмові тягового електродвигуна, що сталася за перевищення допустимого навантаження або температурного режиму, виконуються стандартні ремонтні операції (заміна вузла, розбирання, дефектація, складання), така відмова може бути використана для оцінювання показників ремонтпридатності, але не повинна враховуватися під час визначення показників безвідмовності.

Таким чином, отримана вибірка напрацювань на відмову повинна бути піддана попередній обробці в два етапи.

I етап. Виключення з вибірки даних про відмови, зумовлені грубими порушеннями норм конструювання, технології виготовлення та правил експлуатації рухомого складу.

Звідси випливає, що не всі відмови рухомого складу та його вузлів необхідно враховувати при оцінці показників їх надійності. Розгляду підлягають лише ті вироби, які спроектовані, виготовлені та використовуються за призначенням з дотриманням відповідних норм конструювання, технології виготовлення та правил експлуатації, тобто спроектовані, виготовлені та експлуатуються без «грубих» порушень. Решта елементів вибірки піддаються наступному етапу попередньої обробки.

II етап. Перевірка вибірки на випадіючі точки (виключення з неоднорідної вибірки недостовірних елементів).

Як правило, дані, що характеризують технічний стан нових зразків рухомого складу та рухомого складу експлуатаційного парку, є неоднорідними.

Для грубої перевірки даних вибірки, що викликають сумніви щодо своєї достовірності, використовують правило 3σ , тобто отримане розрахунковим шляхом середнє значення вибірки наробітків на відмову $T_{\text{сер}}$ послідовно зменшують і збільшують на 3σ . Якщо крайні точки інформації не виходять за межі $T_{\text{сер}} \pm 3\sigma$, то всі точки дійсні.

Необхідно зазначити, що відповідно до нерівності Чебишева, яка не вимагає будь-яких припущень про вид функції розподілу, в межах інтервалу $[T_{\text{сер}} - 3\sigma, T_{\text{сер}} + 3\sigma]$ з імовірністю, більшою за 0,889, лежать всі значення t_i випадкової величини наробітку на відмову. Для нормального закону розподілу ця імовірність становить 0,997.

Більш точна перевірка даних вибірки проводиться за критерієм $\square$ (критерієм Ірвіна). У цьому випадку перевіряють крайні точки інформації, а також будь-які суміжні точки.

Розрахункове значення критерію λ_p визначають за рівнянням:

$$\lambda_p = \frac{(t_i - t_{i-1})}{\sigma}, \quad (11.26)$$

де $t_i - t_{i-1}$ – суміжні точки вибірки.

При виконанні умови $\lambda_p < \lambda_T$ точки вибірки (перша і остання) вважаються достовірними, і вони підлягають обліку при подальших розрахунках. В іншому випадку вони вважаються недостовірними і їх виключають. Тут λ_T – табличне значення критерію (коефіцієнта) Ірвіна. Табличні значення критерію Ірвіна наведені в довідниках і монографіях з математичної статистики та теорії обробки експериментальних даних.

Якщо за результатами перевірки отримано випадуючі точки, то необхідно перерахувати середнє значення та СКВ.

Приклад 11.6. Нехай мінімальне і максимальне значення наробітків у вибірці $t_{\min} = 152$ тис. км і $t_{\max} = 780$ тис. км. Загальна кількість точок у вибірці $N=50$. Середнє значення вибірки становить $T_{\text{сер}} = 400$ тис. км, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 105$ тис. км. Перевірити вибірку на випадуючі точки.

Розв'язання. Перевіримо вибірку за правилом 3σ .

Верхня і нижня межі достовірності будуть дорівнювати:

$$T_{\text{сер}} - 3\sigma = 400 - 3 \cdot 105 = 85 \text{ тис. км};$$

$$T_{\text{сер}} + 3\sigma = 400 + 3 \cdot 105 = 715 \text{ тис. км.}$$

Мінімальне значення вибірки $t_{\min} = 152$ тис. км перевищує нижню межу інтервалу. Отже, ця точка інформації повинна бути врахована.

Найбільше значення вибірки $t_{\max} = 780$ тис. км перевищує верхню межу достовірності і тому повинна бути виключена.

Перевіримо вибірку за критерієм Ірвіна.

Фактичні значення критерію для крайніх точок вибірки:

– для найменшої точки вибірки ($t_1 = t_{\min} = 152$ тис. км, $t_2 = 182$ тис. км)

$$\lambda_{p1} = \frac{(t_2 - t_1)}{\sigma} = \frac{(182 - 152)}{105} = 0,286;$$

– для найбільшої точки вибірки ($t_{\max-1} = 630$ тис. км, $t_{\max} = 780$ тис. км)

$$\lambda_{p2} = \frac{(t_{\max} - t_{\max-1})}{\sigma} = \frac{(780 - 630)}{105} = 1,43. \quad (11.27)$$

Табличне значення критерію Ірвіна для $N=50$ дорівнює $\lambda_T=1,1$. Порівняння розрахункових значень критеріїв Ірвіна з табличним свідчить про те, що перша точка вибірки є достовірною ($\lambda_{p1}=0,286<1,1$), а остання точка – недостовірною ($\lambda_{p2}=1,43>1,1$), і її треба виключити. Враховуючи, що остання точка повинна бути виключена, то після її виключення, необхідно виконати перерахунок значень $T_{\text{сер}}$ і σ .

11.6. Визначення показників надійності за результатами спостережень

11.6.1. Вихідні положення та фактори статистичного оцінювання показників надійності

За результатами експлуатаційних випробувань формуються статистичні вибірки значень наробітку одиниць рухомого складу та їхніх елементів. Дані випробувань і спостережень, попередньо перевірені та очищені в процесі первинної обробки, надалі підлягають статистичній обробці.

Статистична обробка полягає в оцінюванні параметрів функцій розподілу випадкових величин, які використовуються для визначення показників надійності. Таким чином, цей етап зводиться до класичних задач математичної статистики, адаптованих до умов експлуатаційних випробувань рухомого складу.

На етапі статистичної обробки визначальними є такі фактори:

- типи показників надійності, що підлягають оцінюванню;
- характер апріорної інформації про досліджувану випадкову величину;

– типи вибірок, сформованих за результатами випробувань (характер і повнота статистичного матеріалу).

Типи показників надійності, що оцінюються. Під час експериментального оцінювання надійності визначаються показники двох основних типів.

Показники типу “наробіток” – середній або γ -відсотковий наробіток: до відмови; між відмовами; до граничного стану; термін зберігання; час відновлення тощо. У цьому випадку спостережуваними величинами є випадкові інтервали часу або пробігу.

Показники типу “імовірність” – імовірність: безвідмовної роботи; виникнення відмови в довільний момент часу; відновлення працездатного стану за заданий інтервал часу тощо.

Спостережуваними величинами тут є кількісні показники подій у процесі випробувань, зокрема: число відмов; число відновлень; число досягнутих граничних станів.

Характер апріорних відомостей про спостережувану випадкову величину. З огляду на характер апріорних відомостей про функцію розподілу випадкової величини, усе різноманіття практичних задач статистичної обробки фактично зводиться до двох основних варіантів. У першому випадку вид функції розподілу спостережуваної випадкової величини відомий апріорно. Тоді завдання статистичної обробки полягає в отриманні оцінок показників надійності з урахуванням відомого виду функції розподілу та характеру наявного статистичного матеріалу, отриманого в процесі випробувань або експлуатаційних спостережень рухомого складу.

У другому випадку вид функції розподілу спостережуваної випадкової величини є невідомим або відомим лише припущено. У такій ситуації на підставі аналізу фізичних і експлуатаційних процесів, що призводять до відмов елементів рухомого складу, досвіду експлуатації аналогічних виробів, а також попереднього аналізу експериментальних даних (зокрема за формою гістограм напруцювань до відмов) висувається гіпотеза щодо виду функції розподілу. Завдання статистичної обробки полягає в перевірці того, чи не суперечать експериментальні дані прийнятій гіпотезі, а також в оцінюванні параметрів відповідної функції розподілу.

За такої постановки задачі необхідна більш детальна інформація про спостережувану випадкову величину, а сам процес статистичної обробки є складнішим і трудомісткішим. Він обов’язково включає формування варіаційного ряду, побудову гістограм, висунення гіпотези щодо виду функції розподілу, оцінювання точкових значень її пара-

метрів, перевірку узгодженості експериментальних даних із прийнятою гіпотезою та, у разі позитивного результату, визначення інтервальних оцінок параметрів функції розподілу і відповідних показників надійності. Якщо ж гіпотеза про вид функції розподілу відхиляється, процес статистичної обробки повторюється, починаючи з етапу висушення іншого припущення щодо виду розподілу.

Якщо вид функції розподілу не відхилений результатами перевірки, то подальші процедури визначення точкових та інтервальних оцінок параметрів у цілому збігаються з процедурами, що застосовуються у випадку відомого апіорного розподілу.

Особливим є випадок, коли оцінювання параметрів функції розподілу не проводиться, а необхідно безпосередньо визначити значення цієї функції в одній фіксованій точці, тобто оцінити показник імовірнісного типу. Для рухомого складу це, зокрема, може бути імовірність безвідмовної роботи або відмови за заданого пробігу, імовірність відновлення або невідновлення працездатності за фіксований час, імовірність досягнення граничного стану при визначеному наробітку, а також імовірність збереження або втрати встановлених показників якості під час зберігання протягом заданого періоду. У математичній статистиці такі задачі належать до непараметричних.

Непараметричний підхід є найбільш простим з точки зору організації випробувань і спостережень, трудомісткості збору та статистичної обробки інформації. У цьому разі випробування кожного елемента або одиниці рухомого складу проводяться протягом фіксованого часу чи пробігу, не обов'язково одночасно для всіх об'єктів. Контроль їх функціонування може здійснюватися лише на початку та наприкінці випробувань. Результати, що підлягають статистичній обробці, зводяться до загальної кількості випробувань фіксованої тривалості та кількості успішних або неуспішних випробувань.

Отримана в результаті такої обробки оцінка містить мінімальний обсяг інформації і характеризує лише значення функції розподілу в одній точці, що відповідає фіксованому наробітку під час випробувань або експлуатаційних спостережень. За межами цієї точки інформація про поведінку випадкової величини відсутня, тому екстраполяція результатів на інші значення напруження є методично неприпустимою.

Типи випадкових величин, що складають вибірку. Характер статистичного матеріалу, що отримується під час випробувань на надійність, істотно залежить від обраного плану випробувань. Незалежно від конкретного плану, у процесі спостережень формуються лише три типи реалізацій випадкових величин, з яких складається вибірка.

До них належать *повні реалізації*, тобто напрацювання до відмови, *неповні реалізації*, які відповідають безвідмовним напрацюванням, а також *умовні реалізації* – напрацювання до моменту контролю, під час якого виявлено відмову. Останній тип фактично відповідає повним реалізаціям у разі застосування стратегій з періодичним контролем, коли відмова фіксується не в момент її виникнення, а під час чергової перевірки технічного стану.

Відповідно до характеру отриманих реалізацій у процесі випробувань на безвідмовність формуються два основні типи вибірок – повні та усічені (цензуровані). Саме усічені вибірки є найбільш характерними для задач статистичного оцінювання надійності конструкцій рухомого складу, зокрема вагонів і локомотивів, що експлуатуються за умов регламентованих міжконтрольних і міжремонтних інтервалів.

Повні вибірки містять лише повні або умовні реалізації випадкової величини. У такій вибірці кожен її елемент являє собою наробіток до відмови або наробіток до моменту контролю, коли відмову було виявлено. У цьому випадку для кожного об'єкта випробувань або спостережень відомий фактичний наробіток до відмови, що суттєво спрощує подальшу статистичну обробку даних.

Усічені вибірки включають як повні (або умовні), так і неповні реалізації випадкової величини. Інакше кажучи, такі вибірки містять одночасно наробітки до відмови та безвідмовні наробітки, коли для частини об'єктів відмова протягом періоду спостережень не зафіксована. Формування усічених вибірок є типовим для експлуатаційних випробувань рухомого складу, які обмежені за часом або пробігом.

Усічені вибірки, як правило, отримують у результаті усічення спостережень за часом або напрацюванням, наприклад при реалізації планів випробувань типу $[NUT]$ або $[NRT]$. Такі вибірки містять d повних або умовних реалізацій, значення яких не перевищують встановлену тривалість випробувань T , а також s неповних реалізацій, для яких відмова не настала до моменту завершення спостережень. При цьому виконується співвідношення $d=N-s$, де N – загальна кількість реалізацій у вибірці.

Отримання як повних, так і усічених вибірок можливе за планів випробувань із безперервним або періодичним контролем технічного стану. Результати будь-яких випробувань на надійність доцільно подавати у графічному вигляді – у формі схеми процесу випробувань та діаграми реалізацій. Таке подання наочно і однозначно відображає специфіку отриманого статистичного матеріалу та полегшує його по-

дальший аналіз і інтерпретацію при оцінюванні показників надійності рухомого складу. Детально це розглянуто у підрозділі 11.3.

11.6.2. Визначення точкових оцінок у разі відомого закону розподілу

Методи визначення точкових оцінок параметрів розподілів. У разі коли закон розподілу (функція розподілу), якому підпорядковується вибірка, вважається відомим, то статистична обробка експериментальних даних зводиться до отримання точкових оцінок параметрів цього закону. При цьому методи визначення точкових оцінок, що застосовуються під час обробки результатів випробувань на надійність, умовно поділяють на дві основні групи: аналітичні та графічні. До аналітичних методів належать метод максимальної правдоподібності, метод моментів, метод квантилів та інші споріднені підходи. Графічні методи ґрунтуються на використанні імовірнісних паперів¹, номограм і різних видів аналітично-графічних побудов. При обробці конкретних результатів випробувань принципово важливим є питання застосовності того чи іншого методу, а також критеріїв його переваги в конкретній ситуації.

Формальними критеріями якості точкових оцінок у математичній статистиці вважаються їхня узгодженість, незміщеність і ефективність (див. підрозділ 2.6). Оцінка називається узгодженою, якщо зі зростанням обсягу вибірки вона збігається за імовірністю до істинного значення оцінюваного параметра. Незміщеною є така оцінка, математичне сподівання якої дорівнює істинному значенню параметра, що означає відсутність систематичної похибки. Якщо розглядати дві узгоджені та незміщені оцінки, то кращою вважається та, що має меншу дисперсію. Оцінка називається ефективною, якщо її дисперсія є найменшою серед усіх можливих незміщених оцінок відповідного параметра.

Очевидно, що з теоретичної точки зору найкращою є оцінка, яка одночасно є узгодженою, незміщеною та ефективною. Проте на практиці такі оцінки можуть бути отримані не для будь-якого статистичного матеріалу. Тому вибір методу оцінювання не завжди визначається лише його формальними статистичними властивостями. У багатьох випадках він зумовлюється характером наявних даних, зокрема

¹ Імовірнісний папір – спеціально розграфлений папір, побудований таким чином, що графік функції конкретного розподілу (нормального, Вейбулла та ін.) зображується на ньому прямою лінією. Імовірнісний папір дозволяє швидко перевірити гіпотезу про відповідність емпіричної функції розподілу конкретному теоретичному розподілу.

наявністю або відсутністю апіорних відомостей про вид функції розподілу та типом отриманої вибірки, що формується в результаті випробувань або експлуатаційних спостережень рухомого складу.

Під час вибору методів оцінювання необхідно також враховувати специфічну особливість експериментальних робіт з оцінювання надійності – підвищену імовірність виникнення грубих помилок. Практика показує, що такі помилки можуть виникати навіть за формально коректного використання строгого аналітичного апарату і внаслідок цього часто залишаються неусвідомленими. Зокрема, для статистичної інформації про надійність характерна відносно висока імовірність потрапляння до вибірки аномальних реалізацій, які можуть бути наслідком помилок фіксації моменту відмови або помилок класифікації відмов. Аналітичні методи точкових оцінок, що виходять з однакового рівня довіри до кожного елемента вибірки, зазвичай є малочутливими до такого «засмічення» даних. Натомість універсальність і наочність графічних методів дозволяють виявляти та виключати принаймні грубі помилки. Саме тому при обробці результатів випробувань на надійність рухомого складу за умов малого обсягу статистичної інформації, обмеженої її достовірності та лише орієнтовних відомостей про вид розподілу досліджуваної випадкової величини графічні методи набувають особливого практичного значення.

У разі, коли вид функції розподілу відомий апіорно, для отримання точкових оцінок параметрів розподілу та відповідних показників надійності може бути використаний один з класичних аналітичних методів. Розподіли, які найчастіше використовуються в практиці надійності, представлені в табл. 11.6.

Метод моментів є одним із базових аналітичних підходів. Ідея методу моментів полягає в тому, що теоретичні моменти розподілу, які залежать від невідомих параметрів, прирівнюються до відповідних емпіричних моментів, обчислених за вибіркою.

Якщо кількість використаних моментів дорівнює числу невідомих параметрів розподілу, то утворюється система рівнянь, розв'язання якої дозволяє отримати точкові оцінки цих параметрів.

Застосування методу моментів спирається на закон великих чисел, відповідно до якого за достатньо великої кількості відмов n або реалізацій значення емпіричних моментів є близькими до теоретичних. Саме це забезпечує можливість практичного використання методу моментів при статистичному оцінюванні показників надійності рухомого складу за результатами експлуатаційних спостережень.

Емпіричним моментом k -го порядку називається величина

Таблиця 11.6

Основні характеристики найбільш поширених розподілів

Характеристика	Розподіл				
	експоненційний	нормальний	логарифмічно-нормальний	Вейбула	гама
Функція розподілу $F(t)$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{u^2}{2}} du,$ $Z = (t - a)/\sigma$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{u^2}{2}} du,$ $Z = (\ln t - \mu)/\sigma$	$1 - e^{-(t/a)^b}$	$1 - e^{-\frac{t}{\beta}} \sum_{i=0}^{\alpha} \frac{1}{i!} \left(-\frac{t}{\beta}\right)^i$
Густина розподілу $f(t)$	$\lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-a}{\sigma}\right)^2},$ $-\infty < t < \infty$	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2},$ $0 < t \leq \infty$	$\frac{bt^{b-1}}{a^b} e^{-(t/a)^b}, t \geq 0$	$\frac{1}{\Gamma(\alpha+1)\beta^{\alpha+1}} t^{\alpha} e^{-t/\beta},$ $\alpha > -1, \beta > 0, 0 < t < \infty$
Математичне сподівання M	$1/\lambda$	a	$e^{\mu + \sigma^2/2}$	$a\Gamma(1+1/b)$	$\beta(\alpha+1)$
Дисперсія D	$\frac{1}{\lambda^2}$	σ^2	$e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$	$a^2 \left[\frac{\Gamma(2/b+1)}{\Gamma^2(1/b+1)} \right]$	$\beta^2(\alpha+1)$
Мода M_0 , $f'(t) = 0$	—	a	$e^{\mu - \sigma^2}$	$a(1 - 1/b)^{1/b}$	$\alpha\beta$
Медіана M_e	$0,69 \cdot \frac{1}{\lambda}$	a	e^{μ}	$a \ln(2)^{1/b}$	$e^{-\frac{t}{\beta}} \sum_{i=0}^{\alpha} \frac{1}{i!} \left(\frac{t}{\beta}\right)^i = 0,5$
95 % квантиль $M_{\max}$, $F(M_{\max}) = 0,95$	$3 \frac{1}{\lambda}$	$a + 1,645\sigma$	$e^{(\mu + 1,645\sigma)}$	$a(\ln 20)^{1/b}$	$e^{-\frac{t}{\beta}} \sum_{i=0}^{\alpha} \frac{1}{i!} \left(\frac{t}{\beta}\right)^i = 0,95$

$$I_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^k, \quad (11.28)$$

де t_i – зафіксовані під час випробувань наробітки між відмовами (повні реалізації);

n – обсяг вибірки (кількість повних реалізацій).

Наприклад, для двопараметричного розподілу Вейбулла маємо

$$f(t, a, b) = \frac{b}{a^b} t^{b-1} e^{-(t/a)^b}, \quad (11.29)$$

перший і другий початкові моменти визначаються виразами:

$$m_1 = a\Gamma(1 + 1/b); \quad (11.30)$$

$$m_2 = a^2\Gamma(1 + 2/b). \quad (11.31)$$

Тоді для знаходження оцінок a і b параметрів розподілу Вейбулла можна з урахуванням (11.28) скласти наступні два рівняння:

$$\hat{a}\Gamma\left(1 + \frac{1}{\hat{b}}\right) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}. \quad (11.32)$$

$$\hat{a}^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{\hat{b}}\right) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2}{n}. \quad (11.33)$$

Оцінки параметрів деяких розподілів, отримані методом моментів, представлені в табл. 11.7.

У табл. 11.7 прийняті наступні позначення:

$$\hat{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad \text{— перший вибіркового момент};$$

$$S^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i\right)^2}{n^2} \quad \text{— вибіркова дисперсія};$$

Оцінки параметром деяких розподілів, отримані методом моментів

Розподіл	Параметр
Експоненційний	$\hat{\lambda} = 1/\hat{T}$
Нормальний	$\hat{a} = \hat{T}, \hat{\sigma} = \sqrt{S^2}$
Логарифмічно-нормальний	$\mu = \hat{u}, \hat{\sigma} = \sqrt{v^2}$

$\hat{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i$ – вибіркове середнє для логарифмічних розподілів;

$v^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2}{n(n-1)}$ – вибіркова дисперсія для логарифмічних

розподілів.

Метод моментів у попередньому викладі було застосовано до вибірки, що містить лише повні реалізації (вибірка 1А). Аналогічна процедура може бути використана і для вибірки, сформованої з умовних реалізацій (вибірка 2А). Перевагою методу моментів є простота його практичного застосування, однак отримані за цим методом оцінки не належать до ефективних. Тому використання методу моментів доцільне лише за достатнього обсягу вибірки, зокрема за наявності не менше ніж 30 повних реалізацій. У разі оброблення усічених вибірок методом моментів для оцінювання параметрів використовуються лише повні реалізації, що зумовлює виникнення систематичної похибки у вигляді заниження оцінок порівняно з істинними значеннями параметрів.

Метод квантилів. Для оцінювання параметрів розподілу методом квантилів, аналогічно до методу моментів, використовують рівняння, у яких квантили теоретичного розподілу прирівнюються до відповідних емпіричних квантилів. Кількість використовуваних емпіричних квантилів і, відповідно, число рівнянь визначається кількістю параметрів розподілу, що підлягають оцінюванню.

Наприклад, для оцінок $\hat{a}$ і $\hat{b}$ розподілу Вейбулла застосовуються наступні два рівняння:

$$1 - e^{-(t_1/\hat{a})^{\hat{b}}} = F_1; \quad (11.34)$$

$$1 - e^{-(t_2/\hat{a})^{\hat{b}}} = F_2, \quad (11.35)$$

де $\hat{a}$, $\hat{b}$ – параметри a и b розподілу Вейбулла;

t_1 , t_2 – квантилі емпіричної функції розподілу (обрані значення наробітків);

F_1 , F_2 – значення емпіричної функції розподілу, що відповідають квантилям t_1 і t_2 .

$$F_1 = m_1/n, \quad F_2 = m_2/n;$$

m_1 , m_2 – кількість відмов для наробітку t_1 та t_2 відповідно;

n – обсяг вибірки.

Розв’язуючи рівняння (11.34)–(11.35) відносно $\hat{a}$ і $\hat{b}$, отримуємо відповідні формули для параметрів, наведених в табл. 11.8.

Таблиця 11.8

Оцінки параметрів деяких розподілів, отримані методом квантилей

Розподіл	Параметр
Вейбулла	$\hat{a} = \frac{t_1}{(-\ln F_1)^{\frac{1}{\hat{b}}}}, \quad \hat{b} = \frac{\ln \ln F_2 - \ln \ln F_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}}$
Експоненційний	$\hat{\lambda} = -\ln F_1 / t_1$
Нормальний	$\hat{a} = \frac{\Phi^{-1}(F_1)t_2 - \Phi^{-1}(F_2)t_1}{\Phi^{-1}(F_1) - \Phi^{-1}(F_2)}, \quad \sigma = \frac{t_1 - \hat{a}}{\ln \ln F_1^{-1}}$

У таблиці прийнято такі позначення: $\Phi^{-1}(F_1)$, $\Phi^{-1}(F_2)$ – квантилі функції стандартного нормального розподілу, що відповідають F_1 , F_2 .

Метод квантилів є більш універсальним з огляду на тип вибірки, оскільки його застосування потребує лише коректного визначення емпіричної функції розподілу для вибірок різної структури, що буде розглянуто далі. Водночас оцінки параметрів, отримані методом квантилів, характеризуються підвищеною дисперсією. Так, для нормального розподілу у випадку, коли оцінкою параметра a за методом моментів слугує вибіркове середнє, а за методом квантилів – медіана вибірки (50-та квантиль емпіричної функції розподілу), дисперсія квантильної оцінки виявляється приблизно у 1,6 раза більшою.

Метод максимальної правдоподібності. Метод є універсальним і одним із найефективніших методів оцінювання параметрів розподілу. Його сутність полягає в побудові для зафіксованих експериментальних даних функції правдоподібності L , яка характеризує імовірність отримання саме такого результату спостережень. Шуканими точковими оцінками параметрів вважають ті їх значення, за яких функція правдоподібності набуває максимального значення.

Оцінки параметрів $Q_1, Q_2, \dots, Q_k$, функції розподілу $F(t)$ при використанні методу максимальної правдоподібності визначають з рішення k рівнянь

$$\frac{\partial L}{\partial Q_i} = 0, \quad (i = \overline{1, k}), \quad (11.36)$$

де L – функція правдоподібності.

Замість максимуму функції L для спрощення операції диференціювання зручніше шукати максимум функції $\ln L$, оскільки в цьому випадку екстремум досягається за тих самих значеннях параметрів Q_i . Тоді можна записати

$$\frac{\partial \ln L}{\partial Q_i} = 0. \quad (11.37)$$

Функція правдоподібності для повної вибірки (за наявності у вибірці з n елементів тільки наробітків до відмови) має вигляд:

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i), \quad (11.38)$$

де $f(t_i)$ – густина розподілу наробітку i -го об'єкта до відмови.

Функція правдоподібності для усіченої вибірки (за наявності у вибірці d наробітків до відмови та c безвідмовних наробітків):
– одноразово усіченої

$$\ln L = \sum_{i=1}^d \ln f(t_i) + c \ln [1 - F(T)]; \quad (11.39)$$

– багаторазово усіченою

$$\ln L = \sum_{i=1}^d \ln f(t_i) + \sum_{j=1}^c \ln [1 - F(\tau_j)]; \quad (11.40)$$

де $F(\tau)$ – функція розподілу безвідмовного наробітку. Для одноразово усіченої вибірки $\tau_j = T$ і, отже, $F(\tau_j) = F(T)$;

T – встановлений наробіток до кінця випробувань або календарна тривалість випробувань;

c – кількість безвідмовних наробітків, $c = n - d$.

У формулах (11.39), (11.40) перший доданок функції $\ln L$ враховує повні реалізації, а другий доданок – неповні реалізації.

Метод максимальної правдоподібності забезпечує найбільш повне використання всієї інформації, що міститься в експериментальних даних, зокрема як про відмовні, так і про безвідмовні наробітки. Разом із тим у низці практичних випадків визначення оцінок цим методом потребує розв'язання складних і громіздких рівнянь.

Приклад 11.7. В результаті випробувань за планом $[NRN]$ отримано вибірку, елементи якої розподілені за нормальним законом. Визначити параметри a і S розподілу.

Розв'язання. Густина імовірності нормального розподілу визначається формулою, наведеною у табл. 11.6, а відповідна їй функція правдоподібності матиме вигляд:

$$\begin{aligned} L = \sum_{i=1}^n f(t_i) &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t_i - a}{S} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{1}{(S\sqrt{2\pi})^n} \exp \sum_{i=1}^n \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t_i - a}{S} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (11.41)$$

Тоді логарифм функції правдоподібності

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln S^2 - \frac{1}{2S^2} \sum_{i=1}^n (t_i - a)^2. \quad (11.42)$$

Взявши частинні похідні $\ln L$ по a ($\partial \ln L / \partial a = 0$) і S ($\partial \ln L / \partial S = 0$), отримаємо рівняння

$$\frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^n (t_i - a) = 0; \quad (11.43)$$

$$-\frac{n}{2S^2} + \frac{1}{2S^2} \sum_{i=1}^n (t_i - a)^2 = 0. \quad (11.44)$$

Розв'язуючи систему цих рівнянь, отримаємо співвідношення для обчислення оцінок a і S

$$\hat{a} = \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad \hat{S}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 = \sigma^2. \quad (11.45)$$

Приклад 11.8. Обробка результатів непараметричних випробувань. Нагадаємо, що при випробуваннях за схемою $\{NUT\}$ ми маємо тільки відомості про кількість виробів, підданих випробуванням, і кількість виробів, що відмовили за час випробувань (вибірка типу 2Г, табл. 11.3). Єдиним показником, який може бути оцінений за такою вибіркою, є імовірність відмови q за час випробувань T . Умови випробувань за схемою $\{NUT\}$ відповідають класичній схемі незалежних випробувань Бернуллі.

Розв'язання. Відомо, що для схеми випробувань Бернуллі, якщо в результаті N дослідів отримано n відмов, то імовірність такої події, тобто функція правдоподібності, визначається виразом:

$$L(q) = C_N^n q^n (1-q)^{N-n}, \quad (11.46)$$

де C_N^n – кількість можливих способів розміщення n відмов серед N випробувань.

Рівняння (11.46) при фіксованих N і n (результати випробувань) є функцією, що залежить тільки від невідомого параметра q .

Завдання визначення точкової оцінки параметра q зводиться до формальної процедури пошуку координати точки максимуму функції (11.46). Зазвичай для спрощення операції диференціювання функцію правдоподібності спочатку логарифмують. У розглянутому випадку

$$\lg L = \lg C_N^n + n \lg q + (N - n) \lg (1 - q). \quad (11.47)$$

Потім

$$\partial \lg L / \partial q = n/q - (N - n)/(1 - q). \quad (11.48)$$

Тоді рівняння для оцінки $\hat{q}$ запишеться у вигляді:

$$n/\hat{q} - (N - n)/(1 - \hat{q}) = 0, \quad (11.49)$$

звідки отримуємо шукану оцінку максимальної правдоподібності для параметра q

$$\hat{q} = n/N. \quad (11.50)$$

Оцінка, що визначається (11.50), є незміщеною та ефективною.

Приклад 11.9. В результаті випробувань за планом $[NRT]$ отримано багаторазово усічену вибірку, що містить d наробітків до відмови (повних реалізацій t_i) і c різних безвідмовних наробітків (неповних реалізацій τ_j). Передбачається, що наробіток до відмови випробовуваних виробів підпорядковується розподілу Вейбулла. Обчислити оцінки параметрів a і b розподілу.

Розв'язання. Функція розподілу Вейбулла має вид:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/a)^b}, \quad (11.51)$$

а її густина –

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} e^{-(t/a)^b}. \quad (11.52)$$

Логарифм функції правдоподібності за наведених вище умов матиме вигляд:

$$\ln L = \sum_{i=1}^d \ln f(t_i) + \sum_{j=1}^c \ln [1 - F(\tau_j)] \quad (11.53)$$

або з врахуванням (11.51)–(11.52)

$$\ln L = d \ln b - db \ln a + (b-1) \sum_{i=1}^d \ln t_i - a^{-b} \left(\sum_{i=1}^d t_i^b + \sum_{j=1}^c \tau_j^b \right). \quad (11.54)$$

Для отримання оцінок параметрів використовуються рівняння:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = 0 \quad \text{та} \quad \frac{\partial \ln L}{\partial b} = 0. \quad (11.55)$$

Розв'язуючи систему двох рівнянь (диференціюючи та виконуючи алгебраїчні перетворення), знаходимо співвідношення для обчислення оцінок a та b

$$\hat{a} = \left[\left(\sum_{i=1}^d \hat{t}_i^{\hat{b}} + \sum_{j=1}^c \hat{\tau}_j^{\hat{b}} \right) / d \right]^{1/\hat{b}}; \quad (11.56)$$

$$1 + \frac{b}{d} \sum_{i=1}^d \ln t_i = \frac{\hat{b} \left(\sum_{i=1}^d \hat{t}_i^{\hat{b}} \ln \hat{t}_i + \sum_{j=1}^c \hat{\tau}_j^{\hat{b}} \ln \hat{\tau}_j \right)}{\sum_{i=1}^d \hat{t}_i^{\hat{b}} + \sum_{j=1}^c \hat{\tau}_j^{\hat{b}}}. \quad (11.57)$$

Рівняння (11.57) вирішується методом послідовних наближень. При цьому в якості першого наближення для оцінки $\hat{b}$ можна прийняти значення, отримане методом моментів, або значення, отримане графічним методом. Після визначення $\hat{b}$ з (11.56) знаходиться значення $\hat{a}$.

Метод максимальної правдоподібності забезпечує найбільш повне використання інформації, що міститься в експериментальних даних, однак у ряді практичних випадків отримання оцінок за цим методом пов'язане з необхідністю розв'язання складних і громіздких рівнянь.

Достовірність оцінок, отриманих будь-яким аналітичним методом, істотно залежить від коректності припущень щодо виду функції розподілу досліджуваної випадкової величини. Тому навіть за умови, що закон розподілу вважається апріорі відомим, перед застосуванням формальних процедур точкового оцінювання параметрів доцільно виконати перевірку узгодженості емпіричного розподілу з теоретичним. Така перевірка здійснюється із застосуванням графічних методів попереднього аналізу (зокрема імовірнісних діаграм) та підтверджується формальними статистичними критеріями узгодженості.

Точкові оцінки параметрів основних розподілів. Застосування параметричних методів оцінки показників надійності регламентується ДСТУ 3004:1995 «Надійність техніки. Методика оцінювання показників за експериментальними даними».

Точкові оцінки параметрів законів розподілу розраховують методом максимальної правдоподібності в таких випадках [6]:

$$\begin{aligned} 6 \leq N < 10, & \quad r/N > 0,5;^1 \\ 10 \leq N < 20, & \quad r/N > 0,3; \\ 20 \leq N < 50, & \quad r/N > 0,2; \\ 50 \leq N < 100, & \quad r/N > 0,1; \\ 100 \leq N < 400, & \quad r/N > 0,05; \\ N \geq 400, & \quad r/N > 0,01. \end{aligned}$$

В інших випадках використовують наближені методи, які властиві певним законам розподілу, або розраховують тільки нижні довірчі границі показників надійності.

Якщо під час випробувань або експлуатації відомо лише, чи об'єкт відмовив чи ні, але неможливо визначити точний момент відмови, то надійність оцінюють за імовірністю безвідмовної роботи, використовуючи формули біноміального розподілу, наведеними у [6].

Точкову оцінку параметрів *експоненційного* розподілу обчислюють за формулами, наведеними в табл. 11.9.

Позначення в табл. 11.9:

r – задана кількість виробів, що відмовили (для плану $[NUr]$), або задана кількість відмов (граничних станів) для планів $[NMr]$, $[NRr]$, при досягненні якої випробування (спостереження) припиняють;

d – кількість виробів, що відмовили (для плану $[NUT]$), або кількість відмов (граничних станів) для планів $[NMT]$, $[NRT]$ за час випробувань (спостережень) T . Для планів спостережень виду $[NU...]$ і $[NM...]$ величини r і d є числом повних реалізацій у вибірці;

t_i – окреме i -те значення випадкової величини (наробіток до відмови);

N – кількість об'єктів, поставлених на спостереження.

¹ Відношення r/N показує, наскільки достатньо у вибірці зафіксовано відмов. Якщо об'єктів мало, для коректної оцінки параметрів потрібно, щоб відмов було відносно багато; зі збільшенням кількості об'єктів навіть невелика частка відмов забезпечує надійний статистичний результат.

**Формули для визначення точкової оцінки параметра
експоненційного розподілу**

План випробувань	Формула
[NUN]	$\frac{N-1}{\sum_{i=1}^N t_i}, N>1$
[NUR]	$\frac{r-1}{\sum_{i=1}^r t_i + (N-r) \cdot t_r}, r>1$
[NUT]	$\frac{d}{\sum_{i=1}^d t_i - (N-d) \cdot T}, d>1$
[NMr]	r/Nt_r
[NMT]	d/NT

Точкові оцінки параметрів a і b розподілу **Вейбулла** для $N > 15$ і планів [NUN], [NUR] і [NUT] обчислюють залежно від плану спостережень методом максимальної правдоподібності за наступними формулами.

Оцінка параметра a :

– для плану [NUN]

$$\hat{a} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} \right)^{1/\hat{b}}; \quad (11.58)$$

– для планів [NUT] і [NUR]

$$\hat{a} = \left\{ \left[\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}} + (N-m) \cdot t_m^{\hat{b}} \right] / m \right\}^{1/\hat{b}}, \quad (11.59)$$

де m – кількість виробів, відмовили на момент закінчення випробувань: $m = r$ – для планів [NUR], [NMr], [NRr], $m = d$ – для планів [NUT], [NMT], [NRT];

t_m – найбільший за значенням наробіток виробу на відмову на момент закінчення випробувань (спостережень): $t_m = t_r$ – для плану $[NUR]$, $t_m = t_d$ – для плану $[NUT]$.

Оцінка параметра b :

– для плану $[NUN]$

$$\left(\frac{N}{\hat{b}} + \sum_{i=1}^N \ln t_i \right) \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} - N \sum_{i=1}^N t_i^{\hat{b}} \ln t_i = 0; \quad (11.60)$$

– для планів $[NUT]$ і $[NUR]$

$$\begin{aligned} \left(\frac{m}{\hat{b}} + \sum_{i=1}^m \ln t_i \right) \left[\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}} + (N-m)t_m^{\hat{b}} \right] - \\ - m \left[\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}} \ln t_i + (N-m)t_m^{\hat{b}} \ln t_m \right] = 0; \end{aligned} \quad (11.61)$$

Для $N \leq 15$ і планів $[NUN]$, $[NUR]$, $[NUT]$ та $[NUz]$ оцінки параметрів a і b обчислюють за формулами, наведеними в [6].

Порядок розв'язання рівнянь (11.58) – (11.61) відносно параметрів $\hat{a}$ і $\hat{b}$ методом послідовних наближень наступний. Обчислюють коефіцієнт

$$A = \sum_{i=1}^m \ln t_i / m. \quad (11.62)$$

Розраховують початкове наближення параметра $\hat{b}$

$$\hat{b}_0 = \frac{m+1}{[A - \ln t_1](0,23m + 3,71)}. \quad (11.63)$$

Далі визначаються наступні наближення $\hat{b}_k$ ($k = 1, 2, \dots$) за формулою:

$$\hat{b}_k = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \ln t_i t_i^{\hat{b}_{k-1}} + \sum_{j=1}^n \ln \tau_j \tau_j^{\hat{b}_{k-1}}}{\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}_{k-1}} + \sum_{j=1}^n \tau_j^{\hat{b}_{k-1}}} - A \right)^{-1}, \quad (11.64)$$

де m – кількість виробів, що відмовили (наробітків до відмови) на момент закінчення випробувань: $m = N$ – для плану $[NUN]$, $m = r$ – для плану $[NUR]$, $m = d$ – для плану $[NUT]$;

n – кількість виробів, що безвідмовно пропрацювали (кількість безвідмовних наробітків) на момент закінчення випробувань;

t_i – окремі значення наробітків до відмови, $i = \overline{1, m}$;

τ_j – окремі значення безвідмовних наробітків: $\tau_j = t_r$ – для плану $[NUR]$, $\tau_j = T$ – для плану $[NUT]$.

Для одноразово усіченої вибірки

$$\hat{b}_k = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \ln t_i t_i^{\hat{b}_{k-1}} + n \left(\ln T \cdot T^{\hat{b}_{k-1}} \right)}{\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}_{k-1}} + n T^{\hat{b}_{k-1}}} - A \right)^{-1}. \quad (11.65)$$

Процес знаходження наближень припиняють у разі виконання умови

$$\left| \frac{\hat{b}_k - \hat{b}_{k-1}}{\hat{b}_{k-1}} \right| < \varepsilon. \quad (11.66)$$

Значення відносної похибки ε під час оцінки параметра b вибирають з ряду 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1. При цьому, чим точніші результати випробувань, тим менше значення ε . Як правило, значення ε повинно бути не менше 0,01.

Значення $\hat{b}_k$, що задовольняє нерівності (11.66), приймають в якості оцінки параметра b . Потім знайдене значення $\hat{b}$ підставляють у вирази (11.58) або (11.59) для параметра $\hat{a}$.

Точкові оцінки параметрів **нормального** розподілу μ і S для $N > 15$ обчислюють за формулами табл. 11.10 методом максимальної правдоподібності.

Таблиця 11.10

Формули для визначення точкових оцінок параметрів нормального розподілу ($N > 15$)

План випробувань	Формули
[NUN]	$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i; \quad \hat{S} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{\mu})^2 \cdot [E(N-1)]}$
[NUr], [NUT]	$\sum_{i=1}^m \frac{t_i - \hat{\mu}}{\hat{S}} + (N-m) \frac{\varphi\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{S}}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{S}}{\hat{S}}\right]}\right]}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{S}}{\hat{S}}\right]} = 0;$ $m - \sum_{i=1}^m \frac{t_i - \hat{\mu}}{\hat{S}} + (N-m) \frac{\hat{\mu} - t_m}{\hat{S}} \cdot \frac{\varphi\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{S}}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{S}}{\hat{S}}\right]}\right]}{F_0\left[\frac{(\hat{\mu} - t_m)/\hat{S}}{\hat{S}}\right]} = 0$

Позначення в табл. 11.10:

$F_0(\dots)$ – функція нормального розподілу (нормованого);

$\varphi(\dots)$ – густина імовірності нормального розподілу (нормованого);

$E(\dots)$ – коефіцієнт, що враховує поправку на зміщення при оцінці параметра S .

Значення функцій F_0 , φ та E табульовані й наведені в літературі зі статистичної обробки даних.

Розглянемо процедуру розв'язання рівнянь відносно параметрів μ та S для планів випробувань [NUr] і [NUT] із застосуванням методу послідовних наближень. На першому етапі обчислюють допоміжні коефіцієнти за формулами, наведеними в табл. 11.11.

Визначають початкові наближення $\hat{\mu}_0$ і $\hat{S}_0$ для оцінок μ і S за формулами:

$$\hat{S}_0 = \frac{E - A\left(\frac{D}{B}\right) + \sqrt{\left(E - A\left(\frac{D}{B}\right)\right)^2 + 4m\left(C - \frac{A^2}{B}\right)}}{2m}; \quad (11.67)$$

$$\hat{\mu}_0 = \frac{A}{B} + \frac{D}{B} \hat{S}_0. \quad (11.68)$$

Таблиця 11.11

Формули для обчислення допоміжних коефіцієнтів

Коефіцієнт	Розрахункове вираження
A	$\sum_{i=1}^m t_i + 0,64(N-m)t_m$
B	$m + 0,64(N-m)$
C	$\sum_{i=1}^m t_i^2 + 0,64(N-m)t_m^2$
D	$0,8(N-m)$
E	$0,8(N-m)t_m$

Розраховують коефіцієнти

$$\Delta_k = (N-m)\Delta'_k; \quad \Delta'_k = \lambda_k - 0,8 - 0,64d_k;$$

$$d_k = (t_m - \hat{\mu}_{k-1}) / \hat{S}_{k-1}; \quad \lambda_k = \varphi(d_k) / [1 - F_0(d_k)]; \quad F_k = (N-m)\Delta'_k t_m.$$

Обчислюють наступні наближення $\hat{\mu}_k$ і $\hat{S}_k$ для оцінок μ і S

$$\hat{S}_k = \frac{E + F_k - A\left(\frac{D + \Delta_k}{B}\right)}{2m} + \frac{\sqrt{\left(E + F_k - A\left(\frac{D + \Delta_k}{B}\right)\right)^2 + 4m\left(C - \frac{A^2}{B}\right)}}{2m}; \quad (11.69)$$

$$\hat{\mu}_k = \frac{A}{B} + \left(\frac{D + \Delta_k}{B}\right) \hat{S}_k. \quad (11.70)$$

За оцінки параметрів μ і S приймають значення $\hat{\mu}_k$ та $\hat{S}_k$, для яких дотримуються умови

$$\left| \frac{\hat{\mu}_k - \hat{\mu}_{k-1}}{\hat{\mu}_{k-1}} \right| < \varepsilon, \quad \left| \frac{\hat{S}_k - \hat{S}_{k-1}}{\hat{S}_{k-1}} \right| < \varepsilon. \quad (11.71)$$

Методика визначення точкових оцінок параметрів для інших законів розподілу (DM, DN та логарифмічно-нормального) наведена в [6].

Розглянемо приклади визначення точкових оцінок параметрів розподілів.

Приклад 11.10. За результатами випробувань десяти виробів за планом $[NUT]$ за період $T = 150$ тис. км отримано одноразово усічену вибірку, що включає: п'ять значень наробітків до відмови t_i в тис. км: 27, 51, 69, 73, 114 та п'ять значень безвідмовних наробітків (наробітків до цензурування). Відомо, що наробітки до відмови підпорядковується розподілу Вейбулла. Визначити точкові оцінки параметрів a і b розподілу.

Розв'язання. Для оцінки параметрів використовуємо метод послідовних наближень, розрахункові формули якого наведені вище. Тоді, для $N = 25$, $m = 5$, $n = 15$, $\tau_j = T = 150$ тис. км, $t_m = 114$ тис. км і $\varepsilon = 0,01$.

$$A = \frac{\ln(27) + \ln(51) + \ln(69) + \ln(73) + \ln(114)}{5} = 4,098;$$

Початкове наближення параметра $\hat{b}$

$$\hat{b}_0 = \frac{5+1}{[4,098 - \ln(27)](0,23 \cdot 5 + 3,71)} = 1,54;$$

Перше наближення параметра $\hat{b}$

$$\hat{b}_1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^5 \ln t_i t_i^{1,54} + 5 \cdot (\ln(150) \cdot 150^{1,54})}{\sum_{i=1}^5 t_i^{1,54} + 5 \cdot 150^{1,54}} - 4,098 \right)^{-1} = 1,31.$$

Перевіряємо, чи забезпечено потрібну точність

$$\left| \frac{\hat{b}_1 - \hat{b}_0}{\hat{b}_0} \right| = \left| \frac{1,31 - 1,54}{1,54} \right| = 0,15 > \varepsilon = 0,01.$$

Наступне наближення

$$\hat{b}_2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^5 \ln t_i t_i^{1,31} + 5 \cdot (\ln(150) \cdot 150^{1,31})}{\sum_{i=1}^5 t_i^{1,31} + 5 \cdot 150^{1,31}} - 4,098 \right)^{-1} = 1,358.$$

Перевіряємо, чи забезпечено потрібну точність

$$\left| \frac{\hat{b}_2 - \hat{b}_1}{\hat{b}_1} \right| = \left| \frac{1,358 - 1,31}{1,31} \right| = 0,037 > \varepsilon = 0,01.$$

Наступне наближення

$$\hat{b}_3 = \left(\frac{\sum_{i=1}^5 \ln t_i t_i^{1,358} + 5 \cdot (\ln(150) \cdot 150^{1,358})}{\sum_{i=1}^5 t_i^{1,358} + 5 \cdot 150^{1,358}} - 4,098 \right)^{-1} = 1,347.$$

Перевіряємо, чи забезпечено потрібну точність

$$\left| \frac{\hat{b}_3 - \hat{b}_2}{\hat{b}_2} \right| = \left| \frac{1,347 - 1,358}{1,358} \right| = 0,008 < \varepsilon = 0,01.$$

Потрібна точність забезпечується, тому в якості оцінки параметра b приймаємо $\hat{b} = \hat{b}_3 = 1,347$.

Визначаємо оцінку параметра a

$$\hat{a} = \left\{ \left[\sum_{i=1}^5 t_i^{1,347} + (10 - 5) \cdot 114^{1,347} \right] / 5 \right\}^{1/1,347} = 154,6.$$

Приклад 11.11. За результатами випробувань десяти виробів відповідно до плану $[NUT]$ отримано вибірку з нормальним законом розподілу. Вихідні дані відповідають попередньому прикладу. Слід знайти точкові оцінки параметрів μ та S розподілу із застосуванням методу послідовних наближень.

Розв'язання. Виходячи з даних попереднього прикладу, маємо $N = 10$, $m = 5$, $n = 5$, $t_m = 114$ тис. км.

За формулами, наведеними у табл. 11.11 визначаємо коефіцієнти

$$A = 24 + 51 + 69 + 73 + 114 + 0,64 \cdot (10 - 5) \cdot 114 = 698,8;$$

$$B = 5 + 0,64(10 - 5) = 8,2;$$

$$C = \sum_{i=1}^5 t_i^2 + 0,64 \cdot (10 - 5) \cdot 114^2 = 68003;$$

$$D = 0,8 \cdot (10 - 5) = 4;$$

$$E = 0,8 \cdot (10 - 5) \cdot 114 = 456.$$

Початкові наближення $\hat{\mu}_0$ і $\hat{S}_0$

$$\hat{S}_0 = \frac{456 - 698,8 \cdot \left(\frac{4}{8,2}\right) + \sqrt{\left(698,8 \cdot \left(\frac{4}{8,2}\right)\right)^2 + 4 \cdot 5 \cdot \left(68003 - \frac{698,8^2}{8,2}\right)}}{2 \cdot 5} = 64,9;$$

$$\hat{\mu}_0 = \frac{698,8}{8,2} + \frac{4}{8,2} \cdot 64,9 = 116,9.$$

Розраховують коефіцієнти:

$$d_1 = (114 - 116,9) / 64,9 = -0,045;$$

$$\varphi(d_1) = \varphi(-0,045) = 0,399;$$

$$F_0(d_1) = F_0(-0,045) = 1 - F_0(0,045) = 1 - 0,518 = 0,482;$$

$$\lambda_1 = \varphi(d_1) / [1 - F_0(d_1)] = 0,399 / [1 - 0,482] = 0,77;$$

$$\Delta'_1 = \lambda_1 - 0,8 - 0,64d_1 = 0,77 - 0,8 - 0,64 \cdot (-0,045) = -0,0012;$$

$$\Delta_1 = (N - m)\Delta'_1 = (10 - 5) \cdot (-0,0012) = -0,006;$$

$$F_1 = (N - m)\Delta'_1 t_m = (10 - 5) \cdot -0,0012 \cdot 114 = -0,684.$$

Обчислюємо наступні наближення за формулами (11.69), (11.70)

$$\begin{aligned} \hat{S}_1 = & \frac{456 + (-0,684) - 698,8 \cdot \left(\frac{4 + (-0,006)}{8,2} \right)}{2 \cdot 5} + \\ & + \frac{\sqrt{\left(456 + (-0,684) - 698,8 \cdot \left(\frac{4 + (-0,006)}{8,2} \right) \right)^2 + 4 \cdot 5 \cdot \left(68003 - \frac{698,8^2}{8,2} \right)}}{2 \cdot 5}; \end{aligned}$$

$$\hat{S}_1 = 54,19;$$

$$\hat{\mu}_1 = \frac{698,8}{8,2} + \left(\frac{4 + (-0,006)}{8,2} \right) \cdot 54,19 = 111,62.$$

Перевіряємо, чи досягнута необхідна точність

$$\left| \frac{\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_0}{\hat{\mu}_0} \right| = \left| \frac{111,62 - 116,9}{116,9} \right| = 0,045 > \varepsilon = 0,01;$$

$$\left| \frac{\hat{S}_1 - \hat{S}_0}{\hat{S}_0} \right| = \left| \frac{54,19 - 64,9}{64,9} \right| = 0,165 > \varepsilon = 0,01.$$

Необхідна точність не досягається, тому обчислюємо наступне наближення. У результаті отримаємо:

$$\hat{S}_2 = 54,6; \hat{\mu}_2 = 112,52.$$

Перевіряємо, чи досягнута необхідна точність

$$\left| \frac{\hat{\mu}_2 - \hat{\mu}_1}{\hat{\mu}_1} \right| = \left| \frac{112,52 - 111,62}{111,62} \right| = 0,008 < \varepsilon = 0,01;$$

$$\left| \frac{\hat{S}_2 - \hat{S}_1}{\hat{S}_1} \right| = \left| \frac{54,6 - 54,19}{54,19} \right| = 0,008 < \varepsilon = 0,01.$$

Умови збіжності виконано, тому оцінки параметрів $\hat{\mu}_2 = 112,52$ та $\hat{S}_2 = 54,6$ приймаємо як остаточні.

11.6.3. Визначення точкових оцінок параметрів розподілів у разі невідомого закону розподілу

У випадках, коли вид закону розподілу випадкової величини априорі (до проведення експерименту) є невідомим або відомим лише наближено, визначення точкових оцінок показників надійності ґрунтується на результатах статистичної обробки експериментальних даних. Така обробка передбачає попередній аналіз вибірки, спрямований на встановлення її основних характеристик та формування припущень щодо можливого виду закону розподілу.

Зазвичай послідовність статистичної обробки включає формування статистичного ряду, побудову емпіричних графічних залежностей і висунення гіпотези про закон розподілу, після чого виконують оцінювання точкових значень його параметрів. Перевірка узгодженості експериментальних даних із прийнятою гіпотезою та побудова інтервальних оцінок розглядаються на наступних етапах аналізу.

У практичній діяльності для визначення точкових оцінок параметрів розподілу широко застосовують пакети прикладних програм статистичного аналізу (наприклад, STATISTICA, SPSS, MATLAB, R, а також табличні процесори з відповідними статистичними модулями).

Отримання статистичного ряду та визначення його характеристик. Статистичну обробку вибірових даних починають з упорядкування значень випадкової величини у порядку зростання.

Упорядкований набір значень, що утворюють вибірку, називають *варіаційним (ранжованим) рядом*.

Кількість елементів варіаційного ряду n дорівнює обсягу вибірки.

Різниця між максимальним і мінімальним значеннями варіаційного ряду, які є крайніми порядковими статистиками, визначає *розмах R* вибірки

$$R = t_{\max} - t_{\min}. \quad (11.72)$$

Як зазначалося раніше, за результатами випробувань можуть формуватися вибірки двох типів:

- повні, що містять лише повні реалізації, тобто значення наробітків до відмови;

- усічені, які включають як повні, так і неповні реалізації – наробітки до відмови та безвідмовні наробітки.

Відповідно, варіаційний ряд статистичних даних усіченої вибірки містить як повні, так і неповні реалізації, причому неповні реалізації зазвичай позначаються спеціальним умовним знаком, наприклад зірочкою.

Припустимо, що під час випробувань за планом $[NRT]$ отримано такі значення наробітків до відмови (повних реалізацій), виражені в тис. км: 27, 11, 102, 37, 45, 15, 85, 99, 33, 46, 67, 83 і безвідмовних наробітків (неповних реалізацій) – 9, 14, 53, 74, 51, 64, 120.

Варіаційний ряд у цьому випадку матиме вигляд: 9*, 11, 14*, 15, 27, 33, 37, 45, 46, 51*, 53*, 64*, 67, 74*, 83, 85, 99, 102, 120*.

Кількість повних реалізацій – $d = 12$, кількість неповних реалізацій – $c = 7$, загальна кількість реалізацій – $N = d + c = 12 + 7 = 19$.

Для усічених вибірок обсяг вибірки n і розмах варіаційного ряду R обчислюються за повними реалізаціями, тобто в даному випадку $n = 12$, а $R = 102 - 11 = 91$ тис. км.

Як графічний аналог варіаційного ряду доцільно використовувати ранжовану *діаграму реалізацій*, у якій повні реалізації впорядковують за зростанням, а неповні – за спаданням значень реалізацій (рис. 11.5). Така діаграма наочно відображає розподіл наробітків до відмови та безвідмовних наробітків і дає змогу оцінити характер і рівень надійності об'єкта за експериментальними даними.

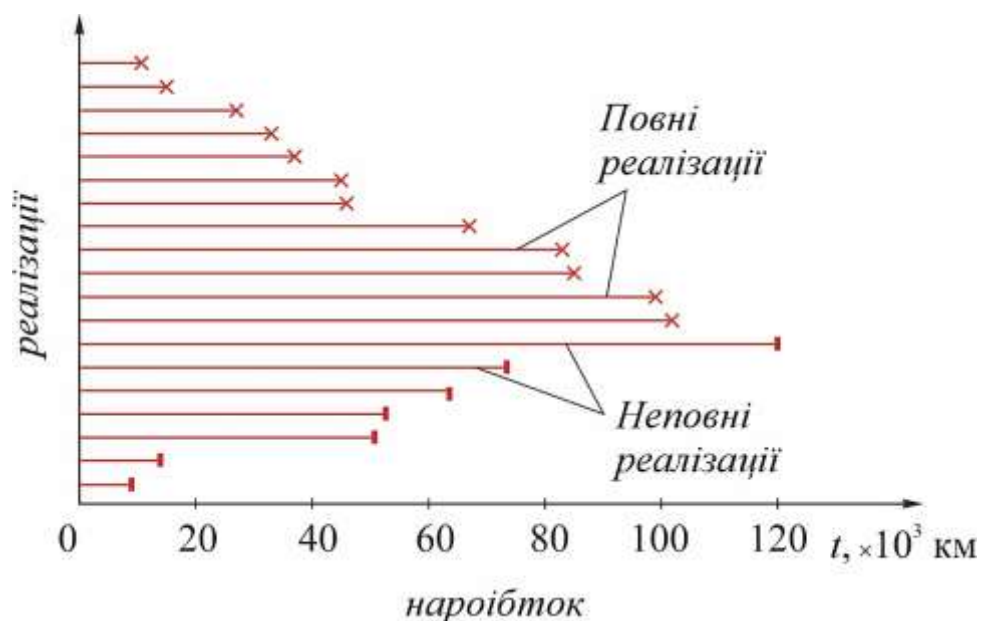


Рис. 11.5. Приклад ранжованої діаграми реалізацій

Подальша обробка статистичних даних полягає в їх інтервальному групуванні, при якому ширину інтервалів визначають за формулою:

$$h = \frac{R}{k}, \quad (11.73)$$

де k – кількість інтервалів, що визначається, використовуючи правило Старджеса.

$$k = 1 + 3,322 \lg n. \quad (11.74)$$

Відповідно до цього правила, за обсягу вибірки до тисячі повних реалізацій рекомендована кількість інтервалів групування не перевищує одинадцяти. Проте для вибірок малого обсягу ($n < 5$), з якими переважно мають справу під час обробки результатів випробувань на надійність, форма гістограми є надто чутливою до способу розбиття, у зв'язку з чим правило (11.74) доцільно застосовувати лише як орієнтовне.

У таких випадках рекомендується будувати кілька варіантів гістограм для різної кількості інтервалів розбиття варіаційного ряду ($k = 3, 4, 5, 6, 7, 8$ тощо). Найбільш прийнятною слід вважати гістограму з мінімальною кількістю інверсій¹. Серед гістограм з однаковою

¹ Інверсія гістограми – зміна знака приросту висоти суміжних прямокутників при переході від одного інтервалу до наступного.

кількістю інверсій перевагу надають тій, яка має більшу кількість інтервалів.

Далі для кожного j -го інтервалу визначають:

- частоту (кількість значень) m_j ;
- відносну частоту (статистичну імовірність) $\hat{p}_j$

$$\hat{p}_j = m_j / n; \quad (11.75)$$

- накопичену частоту (накопичену статистичну імовірність)

$$\hat{F}_j(t) = \sum_{j=1}^k \hat{p}_j; \quad (11.76)$$

- статистичну густину імовірності

$$\hat{f}_j(t) = m_j / nh. \quad (11.77)$$

У разі усічених вибірок

$$\hat{p}_j = m_j / (N - c_j); \quad \hat{f}_j(t) = m_j / (N - c_j)h, \quad (11.78)$$

де m_j – кількість повних реалізацій варіаційного ряду в j -му інтервалі;

N – загальна кількість реалізацій у вибірці (кількість членів варіаційного ряду);

c_j – кількість неповних реалізацій, що не перевищують правої межі розглянутого j -го інтервалу.

В результаті зведення даних в інтервали отримуємо статистичний інтервальний ряд, який зручно представити у вигляді табл. 11.12.

Основними статистичними характеристиками є:

- вибіркове середнє – статистичний початковий момент першого порядку

$$\hat{m}_t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{\sum_{j=1}^k t_j m_j}{n} = \sum_{j=1}^k t_j p_j; \quad (11.79)$$

Визначення параметрів розподілу по інтервалах

Інтервали спостережуваних значень (в одиницях показника надійності)	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$	...	$t_{j-1} - t_j$	...	$t_k - t_{k+1}$
m_j	m_1	m_2	...	m_j	...	m_k
$\hat{p}_j$	$\hat{p}_1$	$\hat{p}_2$	...	$\hat{p}_j$	...	$\hat{p}_k$
$\hat{F}_j(t)$	$\sum \hat{p}_1$	$\sum \hat{p}_2$	...	$\sum \hat{p}_j$	...	$\sum \hat{p}_k$
$\hat{f}_j(t)$	$\hat{f}_1(t)$	$\hat{f}_2(t)$	...	$\hat{f}_j(t)$	...	$\hat{f}_k(t)$

– вибіркова дисперсія – статистичний центральний момент другого порядку

$$\hat{S}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{m}_t)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (t_j - \hat{m}_t)^2 m_j, \text{ за } n > 20;$$

$$\hat{S}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{m}_t)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k (t_j - \hat{m}_t)^2 m_j, \text{ за } n \leq 20;$$
(11.80)

– вибіркове середнє квадратичне відхилення

$$\hat{S} = \sqrt{\hat{S}^2},$$
(11.81)

де t_j – середнє значення в j -му інтервалі.

Використовують також такі статистичні характеристики:

– вибіркова мода – значення випадкової величини (наробітку), що має найбільшу імовірність (значення ознаки, що зустрічається з найбільшою частотою);

– вибіркова медіана¹ – значення ознаки, щодо якої емпірична сукупність ділиться на дві рівні за числом членів частини;

¹ Вибіркова медіана – центральна порядкова статистика варіаційного ряду, тобто член з номером $k = (n+1)/2n$, якщо n – непарне число. Якщо обсяг вибірки n – парне число, то вибіркова медіана визначається як середня (напівсума) двох центральних порядкових статистик.

– статистичний центральний момент третього порядку¹

$$\mu_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{m}_t)^3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (t_j - \hat{m}_t)^3 m_j; \quad (11.82)$$

– статистичний центральний момент четвертого порядку²

$$\mu_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{m}_t)^4 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (t_j - \hat{m}_t)^4 m_j. \quad (11.83)$$

Для наочного аналізу статистичних рядів широко застосовують графічні методи їх подання. Найбільш поширеними серед них є полігон розподілу, гістограма та емпірична функція розподілу. Зазначені інструменти дозволяють візуально оцінити форму розподілу, ступінь варіації та характер концентрації значень випадкової величини.

Гістограма є графічним поданням інтервального статистичного ряду і виступає графічним аналогом диференціальної функції розподілу безперервної випадкової величини.

Графічно гістограму (рис. 11.6) будують у вигляді послідовності прямокутників, ширина яких дорівнює довжині інтервалу h , а висота $\hat{f}_j(t)$ визначається: або частотою (відносною частотою) інтервалу $\hat{f}_j(t) = m_j/h$; або густиною частоти $\hat{f}_j(t) = m_j/(nh)$.

У першому випадку отримують гістограму частот (відносних частот), у другому – гістограму густини розподілу, площа кожного прямокутника якої пропорційна відповідній частоті інтервалу.

У міру зменшення ширини інтервалів гістограма поступово наближається до деякої гладкої кривої, яка відповідає графіку функції густини розподілу випадкової величини τ . Таким чином, побудова гістограм дає змогу отримати наочне уявлення про диференціальний закон розподілу випадкової величини.

Слід зауважити, що форма гістограми істотно залежить від кількості та ширини інтервалів групування.

¹ Третій центральний момент характеризує ступінь асиметрії розподілу. У разі $\mu_3 = 0$ крива розподілу симетрична, у разі $\mu_3 < 0$ має лівосторонню асиметрію, у разі $\mu_3 > 0$ – правосторонню.

² Четвертий центральний момент характеризує ступінь концентрації значень випадкової величини відносно її математичного сподівання та є основою для визначення гостровершинності (ексцесу) розподілу

За надто малого числа інтервалів (коли інтервали є занадто широкими) характерні особливості розподілу виявляються недостатньо чітко. Із збільшенням кількості інтервалів ці особливості проявляються виразніше, проте лише до певної межі. У разі надмірного дроблення вибірки (коли інтервали стають занадто вузькими) гістограма знову втрачає інформативність, перетворюючись на чергування «порожніх» інтервалів та прямокутників близької або однакової висоти.



Рис. 11.6. Гістограма (2) і полігон (1) відносних частот інтервального варіаційного ряду

Полігон розподілу застосовують для графічного подання як дискретних, так і інтервальних статистичних рядів. Під час побудови полігону відносних частот (або частот) для дискретного статистичного ряду точки з координатами (t_i, p_i) або (t_i, m_i) з'єднують відрізками прямих. Для інтервального статистичного ряду з'єднують відрізками середини верхніх сторін прямокутників гістограми (див. рис. 11.6), де t_i – варіанта; p_i, m_i – відносна частота (густина) і частота варіанта.

Емпірична функція розподілу (також відома як статистична функція розподілу, кумулятивна крива або функція накопичених частот) є статистичним аналогом функції розподілу генеральної сукупності, тобто теоретичної функції розподілу.

Емпірична функція розподілу для кожного значення t_i визначає відносну частоту (статистичну імовірність) події, що досліджувана випадкова величина τ набуде значення, меншого за t_i , тобто $\hat{F}(t_i) = \hat{P}(\tau < t_i)$.

Відмінність емпіричної функції розподілу від теоретичної полягає в тому, що теоретична функція розподілу визначає імовірність події $(\tau < t_i)$, тоді як емпірична функція розподілу описує відносну частоту цієї самої події за результатами вибірових спостережень.

Для інтервального статистичного ряду емпірична функція розподілу має вигляд ступеневої кривої (рис. 11.7). Ширина кожної сходинки відповідає довжині інтервалу, а її висота – значенню накопиченої частоти або накопиченої відносної частоти.

Для дискретного статистичного ряду емпірична функція розподілу подається у вигляді ламаної лінії, відрізки якої з'єднують точки з координатами $[t_i, \hat{F}(t_i)]$.

Прийняття гіпотези щодо виду закону розподілу. За формою гістограми статистичних даних можна сформулювати попередню гіпотезу про те, який із відомих теоретичних законів розподілу найточніше апроксимує експериментальні дані про відмови (рис. 11.8). На початковому етапі вибору закону розподілу доцільно також орієнтуватися на значення коефіцієнта варіації.

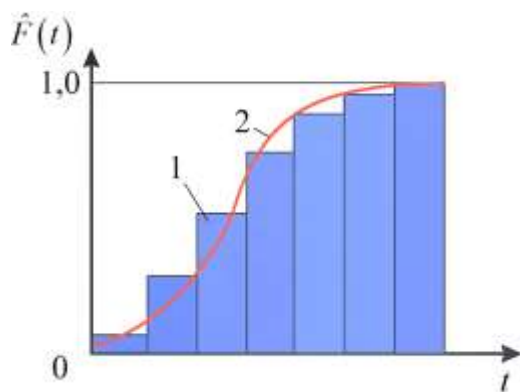


Рис. 11.7 – Функції розподілу:
1 – емпірична; 2 – теоретична

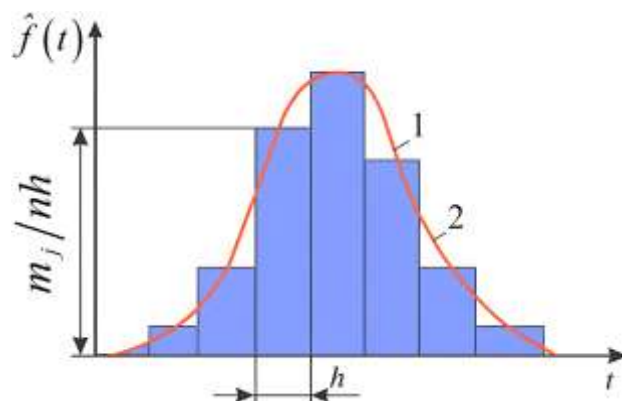


Рис. 11.8 – Гістограма (1) і теоретична
функція (2) густини розподілу

Попередня графічна перевірка узгодженості розподілу. Попередню оцінку узгодженості експериментальних даних із прийнятим (гіпотетичним) законом розподілу виконують графічним методом із використанням імовірнісного паперу відповідного розподілу. При цьому значення емпіричної функції розподілу, обчислені для повних реалізацій варіаційного ряду, наносять на імовірнісний папір. Результати вважають задовільними, якщо сукупність точок емпіричної функції розподілу може бути з достатньою точністю апроксимована прямою лінією.

Оцінювання точкових значень параметрів розподілу. Точкові оцінки параметрів розподілу можуть бути отримані аналітичними методами, зокрема методом моментів, методом максимальної правдоподібності та іншими, розглянутими у відповідному розділі. Крім того, параметри розподілу можуть бути оцінені графічно – за положенням прямої, що апроксимує точки емпіричної функції розподілу на імовірнісному папері. Процедури такого оцінювання детально описані в спеціальній літературі.

Перевірка узгодженості експериментального та теоретичного розподілів. На завершальному етапі статистичної обробки даних ви-

конують перевірку гіпотези щодо виду функції розподілу із застосуванням кількісних критеріїв узгодженості. Найпоширенішими з них є критерії Пірсона та Колмогорова.

11.6.4. Оцінювання показників надійності за відомого виду закону розподілу

Точкові оцінки показників надійності за відомого закону розподілу визначають параметричними методами з використанням формул, наведених у табл. 11.13.

Таблиця 11.13

Формули для визначення точкових оцінок показників надійності за відомого закону розподілу

Закон розподілу з функцією	Формула для обчислення		
	імовірності безвідмовної роботи за напрацювання t $\hat{P}(t)$	середніх показників $\hat{T}_{\text{ср}}$	гамма-відсоткових показників $\hat{t}_{\gamma}$
Експоненційний $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$\exp(-\hat{\lambda}t)$	$\frac{1}{\hat{\lambda}}$	$\frac{1}{\hat{\lambda}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)$
Вейбула $F(t) = 1 - e^{-(t/a)^b}$	$\exp \left[-(t/\hat{a})^{\hat{b}} \right]$	$\hat{a} \cdot \Gamma(1 + 1/\hat{b})$	$\hat{a} \cdot \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{1/\hat{b}}$
Нормальний $F(t) = F_0 \left(\frac{t - \mu}{S} \right)$	$F_0 \left(\frac{\hat{\mu} - t}{\hat{S}} \right)$	$\hat{\mu}$	$\hat{\mu} - u_{\gamma} \hat{S}$
Логарифмічно-нормальний $F(t) = F_0 \left(\frac{\ln t - \mu}{S} \right)$	$F_0 \left(\frac{\hat{\mu} - \ln t}{\hat{S}} \right)$	$\hat{\mu}$	$\hat{\mu} - u_{\gamma} \hat{S}$

У табл. 11.13:

$\hat{P}(t)$ – оцінка імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ за наробіток t ;

$\hat{T}_{\text{ср}}$ – оцінка середніх показників надійності $T_{\text{ср}}$;

$\hat{t}_{\gamma}$ – оцінка гамма-відсоткових показників надійності T_{γ} ;

$\exp(\dots)$ – основа натуральних логарифмів ($e = 2,71828\dots$);

- $F_0(\dots)$ – функція нормального розподілу (нормованого);
 $\Gamma(\dots)$ – гамма-функція;
 $\gamma/100$ – регламентована імовірність;
 $\hat{\lambda}$ – оцінка параметра λ експоненційного розподілу;
 $\hat{a}, \hat{b}$ – оцінки параметрів a, b розподілу Вейбулла;
 $\hat{\mu}, \hat{S}$ – оцінки параметрів μ, S нормального розподілу;
 u_γ – квантиль нормального розподілу, що відповідає імовірності γ .

Інтервальні оцінки показників надійності. У разі *експоненціального* розподілу інтервальні оцінки показників надійності обчислюють за формулами, наведеними в табл. 11.14, а значення довірчих меж $\underline{\lambda}$, $\bar{\lambda}$ параметра λ – за формулами табл. 11.15.

Таблиця 11.14

Формули для обчислення інтервальних оцінок показників надійності для експоненційного розподілу

Найменування показника надійності	Формули для обчислення довірчих меж рівня q	
	нижньою	верхній
Середні показники	$1/\bar{\lambda}$	$1/\underline{\lambda}$
Гамма-відсоткові показники	$\frac{1}{\bar{\lambda}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)$	$\frac{1}{\underline{\lambda}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)$
Імовірність безвідмовної роботи за наробіток t	$\exp(-\bar{\lambda}t)$	$\exp(-\underline{\lambda}t)$
Інтенсивність відмов	$\underline{\lambda}$	$\bar{\lambda}$

Таблиця 11.15

Формули для обчислення довірчих меж параметра експоненційного розподілу

План випробувань	Формули для обчислення довірчих меж рівня q	
	нижньою	верхній
1	2	3
[NUN]	$\frac{\hat{\lambda} \chi_{1-q}^2(2N)}{2(N-1)}; N > 1$	$\frac{\hat{\lambda} \chi_q^2(2N)}{2(N-1)}; N > 1$

Закінчення табл. 11.15

1	2	3
[N U r], [N R r], [N M r]	$\frac{\hat{\lambda}\chi_{1-q}^2(2r)}{2(r-1)}; r > 1$	$\frac{\hat{\lambda}\chi_q^2(2r)}{2(r-1)}; r > 1$
[N U T]	$\frac{\hat{\lambda}N\chi_{1-q}^2(2d)}{d\left[2N-d+1+\frac{1}{2}\chi_{1-q}^2(2d)\right]}; d > 0$	$\frac{\hat{\lambda}N\chi_q^2(2d+2)}{d\left[2N-d+\frac{1}{2}\chi_q^2(2d+2)\right]}; d > 0$ $\frac{r_0}{\sum T}; d = 0$
[N M T], [N R T]	$\frac{\hat{\lambda}\chi_{1-q}^2(2d)}{2d}$	$\frac{\hat{\lambda}\chi_q^2(2d)}{2d}; d > 10$
[N U z]	$\frac{\hat{\lambda}\chi_{1-q}^2(2N)}{2N}$	$\frac{\hat{\lambda}\chi_q^2(2N)}{2N}$

В табл. 11.15: $\sum T$ – сумарний наробіток виробів за час випробувань; значення $\chi^2(\dots)$ та r наведені в [6].

У разі розподілу **Вейбулла** інтервальні оцінки показників надійності обчислюють за формулами табл. 11.16 для $N > 15$.

Таблиця 11.16

**Формули для обчислення інтервальних оцінок показників надійності
для розподілу Вейбулла**

Найменування показника надійності	Формули для обчислення довірчих меж рівня q	
	нижньою	верхній
Середні показники	$\hat{T}_{cp}(1-\varepsilon_n)$	$\hat{T}_{cp}(1-\varepsilon_b)$
Гамма-відсоткові показники	$\hat{T}_{80}(1-\varepsilon_n)$	$\hat{T}_{80}(1-\varepsilon_b)$
	$\hat{T}_{90}(1-\varepsilon_n)$	$\hat{T}_{90}(1-\varepsilon_b)$
	$\hat{T}_\gamma - u_q \sqrt{D(\hat{T}_j)}$	$\hat{T}_\gamma + u_q \sqrt{D(\hat{T}_j)}$
Імовірність безвідмовної роботи за наробіток t	$\hat{P}(t) - u_q \sqrt{D[\hat{P}(t)]}$	–

У разі якщо $N \leq 15$ інтервальні оцінки показників надійності обчислюють за формулами, наведеними в [6].

В табл. 11.16: ε_n , ε_b – граничні відносні помилки для оцінки нижньої та верхньої довірчих меж відповідного показника надійності, значення ε_n та ε_b визначають за графіками, наведеними в [6]; u_q – квантиль нормального розподілу, що відповідає імовірності q ; $D(\hat{T}_j)$, $D[\hat{P}(t)]$ – наближені значення дисперсій для оцінок показників надійності, формули для їх обчислення наведено в [6].

Приклад 11.12. Для умов прикладу 11.10 для оцінки параметрів розподілу Вейбулла, визначити точкові оцінки імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ за наробітками $t = 50, 100$ і 200 тис. км, а також точкові та інтервальні оцінки з довірчою імовірністю $q = 0,9$ середнього наробітку до відмови T_{cp} і гамма-відсоткового (90 %) наробітку до відмови $T_{\gamma=90\%}$.

Точкові оцінки параметрів розподілу Вейбулла, отримані в п. 11.6.2 методом послідовних наближень, дорівнюють $\hat{a} = 154,6$ та $\hat{b} = 1,347$.

Розв'язання. Обчислюємо точкові оцінки показників надійності для розподілу Вейбулла за допомогою формул, наведених у табл. 11.13.

Імовірності безвідмовної роботи:

– за наробіток $t = 50$ тис. км

$$\hat{P}(50) = \exp(-50/154,6)^{1,347} = 0,647;$$

– за наробіток $t = 100$ тис. км

$$\hat{P}(100) = \exp(-100/154,6)^{1,347} = 0,418;$$

– за наробіток $t = 200$ тис. км

$$\hat{P}(200) = \exp(-200/154,6)^{1,347} = 0,175.$$

Середній наробіток до відмови

$$\hat{T}_{cp} = 154,6 \cdot \Gamma(1 + 1/1,347) = 154,6 \cdot \Gamma(1,742) = 141,8 \text{ тис. км.}$$

Гама-відсотковий наробіток до 90 %

$$\hat{T}_{\gamma=90\%} = 154,6 \cdot \left(-\ln \frac{90}{100} \right)^{1/1,347} = 29,1 \text{ тис. км.}$$

Далі виконується розрахунок інтервальних оцінок показників надійності. Формульні залежності для їх визначення у разі припущення закону розподілу Вейбулла наведено в табл. 11.16.

Застосування розрахункових співвідношень потребує попереднього визначення значень ε_n та ε_b – граничних відносних похибок оцінювання відповідно нижньої та верхньої довірчих меж показника надійності. Числові значення ε_n та ε_b встановлюють за номограмами, поданими в [6], для довірчої імовірності $q^* = 0,80; 0,90; 0,95$.

Порядок визначення ε_n та ε_b :

а) на осі абсцис відповідної номограми відкладають відношення r/N та проводять перпендикуляр до перетину з кривою, що відповідає заданій кількості випробуваних об'єктів N ;

б) ординати точки перетину, що відраховані за відповідною шкалою v , визначають значення ε_n (за нижньою частиною шкали) та ε_b (за верхньою частиною шкали). Значення параметра v обчислюють за формулою:

$$v = \frac{\sqrt{\Gamma(1+2/\hat{b}) - \Gamma^2(1+1/\hat{b})}}{\Gamma(1+1/\hat{b})} =$$

$$= \frac{\sqrt{\Gamma(1+2/1,347) - \Gamma^2(1+1/1,347)}}{\Gamma(1+1/1,347)} = 0,748.$$

Тоді для $q = 0,90$, $N = 10$, $r = m = 5$, $r/N = 5/10 = 0,5$ і $v = 0,748$ оцінки довірчих меж середнього наробітку до відмови за рис. М.2 [6] становитимуть $\varepsilon_n = 0,58$, $\varepsilon_b = 1,31$; 90 %-го наробітку до відмови за рис. М.5 [6] – $\varepsilon_n = 0,6$, $\varepsilon_b = 2,1$.

Обчислюємо нижню і верхню довірчі межі рівня q :

– для середнього наробітку до відмови

$$\underline{T}_{cp} = 141,8 \cdot (1 - 0,58) = 59,56 \text{ тис. км;}$$

$$\bar{T}_{cp} = 141,8 \cdot (1 + 1,31) = 327,56 \text{ тис. км;}$$

– для 90 %-го наробітку до відмови

$$\underline{T}_{90} = 29,1 \cdot (1 - 0,6) = 11,64 \text{ тис. км};$$

$$\bar{T}_{90} = 29,1 \cdot (1 + 2,1) = 90,21 \text{ тис. км}.$$

У разі **нормального** розподілу інтервальні оцінки показників надійності обчислюють за формулами табл. 11.17.

Таблиця 11.17

Формули для обчислення інтервальних оцінок показників надійності для нормального розподілу

Найменування показника надійності	Формули для обчислення довірчих меж рівня q	
	нижньою	верхній
Середні показники	$\hat{\mu} - t_q(r-1) \frac{\hat{S}}{\sqrt{r}}$	$\hat{\mu} + t_q(r-1) \frac{\hat{S}}{\sqrt{r}}$
Гамма-відсоткові показники	$\hat{T}_{\text{cp}} - K_1(\gamma, q, r) \hat{S}$	$\hat{T}_{\text{cp}} + K_1(\gamma, q, r) \hat{S}$
Імовірність безвідмовної роботи за наробіток t	$F_0(\underline{h}),$ $\underline{h} \approx \hat{h} - u_q \sqrt{\frac{1}{r} \left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2} \right)};$ $\hat{h} = \frac{t - \hat{\mu}}{\hat{S}}$	$F_0(\bar{h}),$ $\bar{h} \approx \hat{h} + u_q \sqrt{\frac{1}{r} \left(1 + \frac{\hat{h}^2}{2} \right)};$ $\hat{h} = \frac{t - \hat{\mu}}{\hat{S}}$

В табл. 11.17: значення коефіцієнту, що враховується при оцінці гамма-відсоткової напрацювання до відмови для нормального розподілу $K_1(\gamma, q, r)$ і квантиль розподілу Стюдента $t_r(m) = t_q(r-1)$ наведені в довідковій літературі.

11.6.5. Оцінка показників надійності за невідомого закону розподілу

Оцінки показників надійності за невідомого закону розподілу обчислюють непараметричними методами [6].

Точкові оцінки показників надійності обчислюють при кількості відмов (граничних станів) за час випробувань (спостережень) $r > 5$. Якщо $r \leq 5$ використовують нижні довірчі межі показників надійності.

Послідовність обчислення оцінок показників надійності для планів $[NUN]$, $[NUR]$, $[NUT]$ та $[NUz]$ наступна.

1. Наробітки до відмови та наробітки до цензурування (для планів випробувань, відмінних від $[NUN]$) об'єднують у спільний варіаційний ряд, упорядкований за зростанням значень. Якщо деякі значення наробітку до відмови збігаються зі значеннями наробітку працездатних (цензурованих) об'єктів, то у варіаційному ряду спочатку розміщують наробітки до відмови, а після них – наробітки до цензурування.

2. Для варіаційного ряду обчислюють непараметричну оцінку емпіричної функції розподілу часу до відмови $\hat{F}(t_i)$ за формулою:

$$\hat{F}(t_i) = 1 - \prod_{j=1}^i \frac{N_j - 1}{N_j}, \quad i = \overline{1, r}, \quad (11.84)$$

де t_i – окреме значення випадкової величини у вибірці (наробіток до відмови);

i – порядковий номер наробітку у варіаційному ряду;

N_j – кількість працездатних об'єктів безпосередньо перед настанням j -ї відмови у варіаційному ряду;

r – кількість відмов, до появи яких проводяться випробування (спостереження).

Формула (11.84) дозволяє отримати емпіричну функцію розподілу наробітку до відмови в умовах цензурованих спостережень, коли кількість працездатних об'єктів зменшується в процесі випробувань. У граничному випадку відсутності цензурування для планів випробувань $[NUN]$, $[NUR]$ і $[NUT]$, за яких вибування об'єктів до моменту відмови відсутнє, формула (11.84) переходить у класичну оцінку

$$\hat{F}(t_i) = \frac{i}{N}, \quad i \leq m, \quad (11.85)$$

де N – загальна кількість членів варіаційного ряду;

m – кількість зафіксованих відмов (повних реалізацій) у вибірці.

У формулі (11.85) величина m означає кількість повних реалізацій – відмов, що настали в процесі випробувань. Значення індексу i змінюється від 1 до m , оскільки після моменту останньої зафіксованої відмови оцінка емпіричної функції розподілу не визначається.

Для плану $[NUR]$ виконується співвідношення $m = r$, тобто випробування припиняються після настання наперед заданої кількості відмов.

Для плану $[NUN]$ кількість відмов дорівнює обсягу вибірки, тобто $m = N$.

Для плану $[NUT]$ кількість відмов m є випадковою величиною і задовольняє співвідношення $N = m + d$, де d – кількість цензурованих спостережень (об'єктів, що не відмовили до моменту завершення випробувань)¹.

3. Обчислюють *точкові* оцінки:

– *середніх показників надійності*:

– для плану $[NUN]$ середній наробіток до відмови

$$\hat{T}_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i; \quad (11.86)$$

– для планів $[NUT]$ і $[NUR]$ середній наробіток до відмови

$$\hat{T}_{\text{cp}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i + \frac{N-m}{m} \cdot t_m; \quad (11.87)$$

– для планів $[NMr]$ і $[NMT]$:

– середній наробіток на відмову $\hat{T}_0$

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i; \quad (11.88)$$

– середню тривалість відновлення оцінюють тільки для планів $[NUN]$, $[NMr]$ та $[NMT]$ за формулою:

¹ У різних нормативних та навчальних джерелах символ d використовується в різних значеннях. У ДСТУ 3004-95 величина d застосовується для позначення кількості відмов, що настали за фіксований час випробувань, тоді як у цьому підручнику під d розуміють кількість цензурованих спостережень – об'єктів, що не відмовили до моменту завершення випробувань. Таке уточнення введено з метою уникнення неоднозначності тлумачень.

$$\hat{T}_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{Bi}; \quad (11.89)$$

– *гамма-відсоткових показників надійності*

$$\hat{T}_\gamma = t_{i-1} + d_1(t_i - t_{i-1}); \quad (11.90)$$

– *імовірності безвідмовної роботи за наробіток t*

$$\hat{P}(t) = 1 - \hat{F}(t_{i-1}) - d_2[\hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})], \quad (11.91)$$

де t_m – найбільший за значенням наробіток до відмови на момент закінчення випробувань: $t_m = t_r$ – для планів $[NUr]$, $[NRr]$, $[NMr]$, $t_m = T$ – для планів $[NUT]$, $[NRT]$, $[NMT]$;

t_{Bi} – окреме i -те значення тривалості відновлення;

t – заданий наробіток для визначення оцінки імовірності безвідмовної роботи $P(t)$;

d_1 – коефіцієнт інтерполяції за імовірністю, що визначає відносне положення рівня $(1-\gamma/100)$ між значеннями $\hat{F}(t_{i-1})$ та $\hat{F}(t_i)$. Значення d_1 показує, яку частину інтервалу $[t_{i-1}, t_i]$ необхідно відкласти від t_{i-1} , щоб досягти заданого γ -процентного рівня надійності;

d_2 – коефіцієнт інтерполяції за наробітком, що визначає відносне положення заданого наробітку t між сусідніми значеннями t_{i-1} та t_i . Значення d_2 характеризує частку інтервалу між двома сусідніми моментами відмови, на якій знаходиться заданий наробіток t ;

$\hat{F}(t_i)$ – оцінка функції розподілу $F(t_i)$ за наробіток $t_i > t$;

$\hat{F}(t_{i-1})$ – оцінка функції розподілу $F(t_{i-1})$ за наробіток $t_{i-1} < t$.

$$d_1 = \frac{(1-\gamma/100) - \hat{F}(t_{i-1})}{\hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})} \text{ за умови } \hat{F}(t_{i-1}) < (1-\gamma/100) < \hat{F}(t_i); \quad (11.92)$$

$$d_2 = \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \text{ за умови } t_{i-1} < t < t_i. \quad (11.93)$$

У формулах (11.90)–(11.93) застосовується лінійна інтерполяція між сусідніми значеннями емпіричної функції розподілу. В окремих граничних випадках інтерполяцію не виконують, а оцінки показників надійності визначають безпосередньо за вузловими значеннями емпіричного розподілу.

Якщо рівень $(1 - \gamma/100)$ збігається з одним із значень емпіричної функції розподілу, γ -процентний наробіток до відмови приймають рівним відповідному значенню наробітку:

$$\hat{T}_\gamma = t_{i-1} \text{ або } \hat{T}_\gamma = t_i, \quad (11.94)$$

якщо

$$(1 - \gamma/100) = \hat{F}(t_{i-1})(1 - \gamma/100) \text{ або } (1 - \gamma/100) = \hat{F}(t_i). \quad (11.95)$$

Якщо заданий наробіток t збігається з одним із вузлових значень емпіричного розподілу, імовірність безвідмовної роботи визначають без інтерполяції:

$$\hat{P}(t) = 1 - \hat{F}(t_{i-1}) \text{ або } \hat{P}(t) = 1 - \hat{F}(t_i), \quad (11.96)$$

якщо

$$t = t_{i-1} \text{ або } t = t_i. \quad (11.97)$$

У разі, коли задане значення наробітку повторюється для декількох послідовних реалізацій $t = t_l = t_{l+1} = \dots = t_k$, $k \leq r$, оцінку імовірності безвідмовної роботи визначають як середнє арифметичне відповідних оцінок:

$$\hat{P}(t) = \frac{\sum_{l=1}^k \hat{P}(t_l)}{k - l + 1}, \quad (11.98)$$

де l – індекс першої реалізації у впорядкованому варіаційному ряді, для якої виконується рівність $t = t_l = t_{l+1} = \dots = t_k$, а $(k - l + 1)$ – кількість однакових реалізацій наробітку.

– коефіцієнта готовності:

– для планів $[NUN]$, $[NUr]$, $[NUT]$, $[NUz]$

$$\hat{K}_r = \frac{\hat{T}_{cp}}{\hat{T}_{cp} + \hat{T}_b}; \quad (11.99)$$

– для планів $[NMr]$, $[NMT]$

$$\hat{K}_r = \frac{\hat{T}_0}{\hat{T}_0 + \hat{T}_b}. \quad (11.100)$$

4. Обчислюють *інтервальні* оцінки, причому у разі заданої довірчій імовірності q^* для двостороннього інтервалу довірчу імовірність q для одностороннього інтервалу визначають за формулою $q = (1 + q^*)/2$, відповідно $q^* = 2q - 1$.

Інтервальні оцінки:

– *середніх* показників надійності:

– нижня довірча границя рівня q

$$\underline{T}_{cp} = \hat{T}_{cp} - u_q \left[\sum_{i=1}^r \frac{\Delta F(t_i)}{r} (t_i - \hat{T}_{cp})^2 \right]^{1/2}; \quad (11.101)$$

– верхня довірча границя рівня q

$$\bar{T}_{cp} = \hat{T}_{cp} + u_q \left[\sum_{i=1}^r \frac{\Delta F(t_i)}{r} (t_i - \hat{T}_{cp})^2 \right]^{1/2}. \quad (11.102)$$

– *гамма-відсоткових* показників надійності:

– нижня довірча границя рівня q

$$\underline{T}_\gamma = t_{i-1} + d_3(t_i - t_{i-1}), \quad t_0 = 0; \quad (11.103)$$

– верхня довірча границя рівня q

$$\bar{T}_\gamma = t_{i-1} + d_4(t_i - t_{i-1}), \quad t_0 = 0; \quad (11.104)$$

– *імовірності безвідмовної роботи за наробіток t*

– нижня довірча границя рівня q

$$\underline{P}(t) = 1 - \bar{F}(t_{i-1}) - d_2 [\bar{F}(t_i) - \bar{F}(t_{i-1})], \quad (11.105)$$

за умови $t_{i-1} < t < t_i$ та $t < t_m$;

– верхня довірча границя рівня q

$$\bar{P}(t) = 1 - \underline{F}(t_{i-1}) - d_2 [\underline{F}(t_i) - \underline{F}(t_{i-1})], \quad (11.106)$$

за умови $t_{i-1} < t < t_i$ та $t < t_m$;

– коефіцієнта готовності

– нижня довірча границя рівня q

$$\underline{K}_r = \left[1 + \frac{\hat{T}_0 \hat{T}_B + u_q \left(\frac{\hat{T}_0^2 \hat{S}_B^2}{m} + \frac{\hat{T}_B^2 \hat{S}^2}{m} + \frac{u_q^2 \hat{S}_B^2 \hat{S}^2}{m^2} \right)^{1/2}}{\hat{T}_0^2 - \frac{u_q^2 \hat{S}^2}{m}} \right]^{-1}, \quad (11.107)$$

– верхня довірча границя рівня q

$$\bar{K}_r = \left[1 + \frac{\hat{T}_0 \hat{T}_B - u_q \left(\frac{\hat{T}_0^2 \hat{S}_B^2}{m} + \frac{\hat{T}_B^2 \hat{S}^2}{m} + \frac{u_q^2 \hat{S}_B^2 \hat{S}^2}{m^2} \right)^{1/2}}{\hat{T}_0^2 - \frac{u_q^2 \hat{S}^2}{m}} \right]^{-1}, \quad (11.108)$$

де $\Delta F(t_i)$ – приріст емпіричної оцінки функції розподілу наробітку до відмови, що відповідає частці реалізацій, які припадають на інтервал $(t_{i-1}, t_i]$;

$$\Delta F(t_i) = F(t_i) - F(t_{i-1}); \quad (11.109)$$

d_3, d_4 – коефіцієнти лінійної інтерполяції, що визначають відносне положення рівня $1 - \gamma/100$ між значеннями емпіричної

функції розподілу $F(t_{i-1})$ та $F(t_i)$ при визначенні нижньої та верхньої довірчої границі відповідно;

$$d_3 = \frac{(1-\gamma/100) - \bar{F}(t_{i-1})}{\bar{F}(t_i) - \bar{F}(t_{i-1})} \quad (11.110)$$

за умови $\bar{F}(t_{i-1}) < (1-\gamma/100) < \bar{F}(t_i);$

$$d_4 = \frac{(1-\gamma/100) - \underline{F}(t_{i-1})}{\underline{F}(t_i) - \underline{F}(t_{i-1})} \quad (11.111)$$

за умови $\underline{F}(t_{i-1}) < (1-\gamma/100) < \underline{F}(t_i);$

$\bar{F}(t_i), \underline{F}(t_i)$ – верхня та нижня довірчі границі функції розподілу за наробіток $t_i > t$;

$\underline{F}(t_{i-1}), \bar{F}(t_{i-1})$ – нижня і верхня довірчі границі функції розподілу за наробіток $t_{i+1} < t$;

$$\bar{F}(t_i) = \frac{\chi_q^2 [2(r_i + 1)]}{2N - r_i + 0,5\chi_q^2 [2(r_i + 1)]}; \quad (11.112)$$

$$\underline{F}(t_i) = \frac{\chi_{1-q}^2 (2r_i)}{2N - r_i + 0,5\chi_{1-q}^2 (2r_i)}, \quad (11.113)$$

$\chi_q^2(\dots)$ – квантиль хі-квадрат розподілу з числом ступенів свободи $(\dots)$, що відповідає ймовірності q ;

$\hat{S}_B$ – вибіркове середньоквадратичне відхилення часу відновлення.

Під час визначення інтервальних оцінок γ -процентних показників надійності можливі граничні випадки, коли рівень $1-\gamma/100$ точно збігається з одним із значень емпіричної функції розподілу. Якщо

виконується хоча б одна з умов $1-\gamma/100 = \bar{F}(t_{i-1})$, $1-\gamma/100 = \bar{F}(t_i)$ або $1-\gamma/100 = \underline{F}(t_{i-1})$ або $1-\gamma/100 = \underline{F}(t_i)$, то γ -процентний показник надійності приймають рівним відповідному вузловому значенню варіаційного ряду: $\underline{T}_\gamma = t_{i-1}$, $\underline{T}_\gamma = t_i$, $\bar{T}_\gamma = t_{i-1}$ або $\bar{T}_\gamma = t_i$ відповідно. Тобто, у цьому випадку застосування лінійної інтерполяції не потрібне, оскільки заданий рівень надійності досягається безпосередньо в точці емпіричного розподілу.

Аналогічно, під час визначення імовірності безвідмовної роботи при заданому наробітку t , якщо виконується одна з умов $t = t_{i-1}$ або $t = t_i$, то імовірність безвідмовної роботи визначають без інтерполяції за формулами $\underline{P}(t) = 1 - \bar{F}(t_{i-1})$, $\bar{P}(t) = 1 - \underline{F}(t_{i-1})$, $\underline{P}(t) = 1 - \bar{F}(t_i)$ або $\bar{P}(t) = 1 - \underline{F}(t_i)$ відповідно до того, з яким вузовим значенням збігається заданий наробіток.

У випадку, коли задане значення наробітку повторюється для декількох послідовних реалізацій $t = t_i = t_{i+1} = \dots = t_k$, $k \leq r$, то оцінку імовірності безвідмовної роботи визначають як середнє арифметичне відповідних значень:

– нижню довірчу границю імовірності безвідмовної роботи

$$\underline{P}(t) = \frac{1}{k-l+1} \sum_{l=1}^k \underline{P}(t_i), \quad (11.114)$$

– верхню довірчу границю імовірності безвідмовної роботи

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{k-l+1} \sum_{l=1}^k \bar{P}(t_i). \quad (11.115)$$

Такий підхід забезпечує коректний облік «сходинок» емпіричної функції розподілу, що виникають у разі наявності однакових значень наробітку.

Для обчислення інтервальних оцінок середніх показників надійності використовують вибіркові дисперсії. Вибіркову дисперсію наробітків між відмовами визначають за формулою:

$$\hat{S}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (t_i - \hat{T}_0)^2, \quad (11.116)$$

а вибірккову дисперсію часу відновлення – за формулою:

$$\hat{S}_B^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (t_{Bi} - \hat{T}_B)^2. \quad (11.117)$$

Запитання до самоконтролю

1. У чому полягає мета випробувань технічних об'єктів на надійність?
2. Чим випробування на надійність відрізняються від функціональних випробувань?
3. Чому показники надійності не можуть бути визначені лише за окремими параметрами елементів?
4. Які показники надійності належать до групи середніх показників?
5. Які показники надійності належать до групи імовірнісних показників?
6. Які експериментальні дані використовують для оцінювання показників типу «наробіток»?
7. Які експериментальні дані використовують для оцінювання показників типу «імовірність»?
8. Які основні задачі розв'язують під час випробувань на надійність?
9. Яку інформацію отримують за результатами ресурсних випробувань?
11. Яке значення мають експлуатаційні випробування для оцінювання надійності?
12. За якими ознаками класифікують випробування на надійність?
13. У чому полягає призначення визначальних випробувань?
14. Яке призначення приймальних випробувань?
15. У чому полягає відмінність між контрольними та дослідницькими випробуваннями?
16. Які випробування належать до стендових?
17. Які випробування належать до експлуатаційних?
18. Чим відрізняються нормальні та прискорені випробування?
19. За якими ознаками випробування поділяють за видом навантажень?
20. Які види випробувань застосовують для оцінювання ремонтпридатності?

21. Які показники оцінюють під час випробувань на відновлюваність?

21. Що називають планом випробувань на надійність?

22. Які основні параметри визначають план випробувань?

23. Що розуміють під обсягом випробувань?

24. Які дані входять до результатів випробувань на надійність?

25. Що називають реалізацією наробітку до відмови?

26. Чим відрізняються повні та неповні реалізації?

27. За яких умов виникає цензурування результатів випробувань?

28. Як впливає цензурування на обробку статистичних даних?

29. Чому під час обробки результатів випробувань необхідно враховувати неповні реалізації?

30. Які причини можуть призвести до припинення випробувань без фіксації відмови?

31. Що називають функцією розподілу наробітку до відмови?

32. Як пов'язані між собою функція розподілу та імовірність безвідмовної роботи?

33. Який фізичний зміст імовірності безвідмовної роботи $P(t)$?

34. Як визначають емпіричну оцінку функції розподілу $\hat{F}(t)$?

35. Що означає величина $\Delta F(t_i)$ у формулах інтервальних оцінок?

36. Як інтерпретують приріст емпіричної функції розподілу?

37. Чому для обробки результатів випробувань використовують впорядкований варіаційний ряд?

38. Як враховують однакові значення наробітку в емпіричному розподілі?

39. У чому полягає призначення гамма-процентних показників надійності?

40. Як визначають гамма-процентний наробіток за емпіричною функцією розподілу?

41. Що називають точковою оцінкою показника надійності?

42. За яких умов застосовують параметричні методи оцінювання?

43. У чому полягає сутність методу максимальної правдоподібності?

44. Які дані використовують у функції правдоподібності за наявності цензурування?

45. Як визначають точкову оцінку середнього наробітку до відмови для плану $[NUN]$?

46. Як визначають точкову оцінку середнього наробітку для планів $[NUT]$ та $[NUT_r]$?

47. Який фізичний зміст оцінки $\hat{T}_{\text{cp}}$?
48. Як визначають точкову оцінку імовірності безвідмовної роботи?
49. Які особливості точкових оцінок за малої статистики відмов?
50. Які припущення закладаються під час використання параметричних методів?
51. Що називають інтервальною оцінкою показника надійності?
52. Чим інтервальна оцінка відрізняється від точкової?
53. Що означає довірчий рівень q ?
54. Як пов'язаний рівень q з квантилем нормального розподілу u_q ?
55. Як визначають нижню довірчу границю середнього показника надійності?
56. Як визначають верхню довірчу границю середнього показника надійності?
57. Яку роль у формулах інтервальних оцінок відіграє вибіркова дисперсія?
58. Як визначають вибіркову дисперсію наробітків між відмовами?
59. Як визначають вибіркову дисперсію часу відновлення?
60. Які фактори впливають на ширину довірчого інтервалу?
61. За яких умов застосовують непараметричні методи оцінювання?
62. Які показники надійності оцінюють непараметричними методами?
63. Як використовується емпірична функція розподілу у непараметричних оцінках?
64. Чому у формулах присутня сума з вагами $\Delta F(t_i)$?
65. Як інтерпретують множник $(t_i - T_{\text{cp}})^2$ у формулах?
66. Яке значення має кількість реалізацій r у формулах інтервальних оцінок?
67. Як враховують повторювані значення наробітку в непараметричних оцінках?
68. За яких умов інтерполяція не виконується?
69. Як визначають імовірність безвідмовної роботи для вузлових значень t_i ?
70. Як визначають середнє значення імовірності безвідмовної роботи при кратних значеннях t ?
71. Для чого у формулах вводять коефіцієнти d_1 та d_2 ?
72. Який фізичний зміст коефіцієнта d_1 ?
73. Який фізичний зміст коефіцієнта d_2 ?

74. За яких умов коефіцієнти інтерполяції не використовують?
75. Як визначають гамма-процентний наробіток у граничних випадках?
76. Як визначають імовірність безвідмовної роботи у граничних випадках?
77. Чому у формулах передбачено спеціальні умови для $t = t_{i-1}$ або $t = t_i$?
78. Яке призначення усереднення значень імовірності безвідмовної роботи?
79. Як враховують інтервали з однаковими значеннями наробітку?
80. Яке значення має параметр k у формулах усереднення?
81. Які показники надійності можуть бути визначені за результатами випробувань?
82. Які методи оцінювання застосовують за відомого виду закону розподілу?
83. Які методи оцінювання застосовують за невідомого виду закону розподілу?
84. Які обмеження характерні для оцінювання показників за малої статистики?
85. Як впливає обсяг вибірки на точність оцінок?
86. Чому необхідно наводити довірчі межі разом із точковими оцінками?
87. Яке значення має коректний вибір плану випробувань?
88. Які помилки можуть виникати при ігноруванні цензурування?
89. Як результати інтервального оцінювання використовують при порівнянні об'єктів?
90. Які показники є найбільш інформативними для оцінювання надійності в експлуатації?
91. За заданими реалізаціями $t_i = 10, 15, 21, 26, 32, 44, 48, 52, 58, 61, 63$ тис. км обчислити $\hat{T}_{\text{ср}}$.
92. За заданими даними обчислити $\hat{S}^2$.
93. За емпіричною функцією розподілу визначити $\hat{F}(t_i)$.
94. Обчислити $\Delta F(t_i)$ для кожного інтервалу.
95. Побудувати інтервальну оцінку середнього наробітку до відмови.
96. Побудувати інтервальну оцінку імовірності безвідмовної роботи для заданого t .

97. Визначити гамма-процентний наробіток за емпіричною функцією розподілу.
98. Проаналізувати вплив рівня q на довірчі межі.
99. Порівняти результати параметричної та непараметричної оцінок.
100. Зробити висновки щодо надійності об'єкта за отриманими інтервальними оцінками.
101. За якими ознаками обирають конкретний план спостережень на надійність?
102. У чому полягає принципова відмінність між планами спостережень з фіксованою кількістю об'єктів та з фіксованою тривалістю спостережень?
103. Які умови завершення спостережень передбачені в плані [NUN]?
104. Які умови завершення спостережень передбачені в плані [NUT]?
105. Які умови завершення спостережень передбачені в плані [NUr]?
106. Яким чином у планах спостережень фіксується момент завершення випробувань без відмови об'єкта?
107. Як у планах спостережень враховують об'єкти, що не відмовили до моменту завершення спостережень?
108. Які значення наробітку вважають найбільшими за результатами спостережень для різних планів?
109. Яку роль відіграє параметр tm у формулах обробки результатів спостережень?
110. Чим відрізняється інтерпретація tm для планів з обмеженням за часом та за кількістю відмов?
111. Які статистичні дані є обов'язковими для обробки результатів за планом [NUT]?
112. Які статистичні дані є обов'язковими для обробки результатів за планом [NUr]?
113. Як впливає вибір плану спостережень на форму вибірки реалізацій наробітку до відмови?
114. Яким чином план спостережень визначає співвідношення повних і неповних реалізацій?
115. У яких випадках доцільно застосовувати план спостережень з великою кількістю неповних реалізацій?

Основні шляхи підвищення надійності рухомого складу

12.1. Конструкційні та схемні шляхи підвищення надійності рухомого складу

Аналіз сукупності чинників, що визначають надійність рухомого складу, свідчить про доцільність виокремлення двох взаємопов'язаних груп заходів щодо її підвищення: заходів, спрямованих на збільшення безвідмовності, та заходів, орієнтованих на підвищення ремонтпридатності (відновлюваності). Найбільша ефективність реалізації таких заходів досягається за умови системного підходу до забезпечення надійності, який передбачає узгоджене та взаємодоповнювальне впровадження рішень на етапах проєктування, виготовлення та експлуатації рухомого складу (рис. 12.1).

Надійність обладнання рухомого складу закладається на етапі проєктування механічної, гідравлічної, пневматичної та електричної частин. Саме на цьому етапі формуються основні конструкційні рішення, що визначають подальший рівень безвідмовності та відновлюваності технічної системи. У процесі розроблення конструкторської документації з метою забезпечення надійності складної технічної системи доцільно виокремлювати основні принципи конструювання.

1. Вибір раціональних конструкційних рішень вузлів, механізмів, складальних одиниць, пультів та інших елементів конструкції, що забезпечують нормальні режими роботи виробу. Реалізація цього принципу ґрунтується на застосуванні полегшених режимів роботи, а також на збільшенні допустимих відхилень параметрів, за яких зберігається працездатність вузла або механізму. З цією метою в конструкцію можуть вводитися спеціальні елементи захисту, призначені для запобігання перевантаженням і руйнуванням.

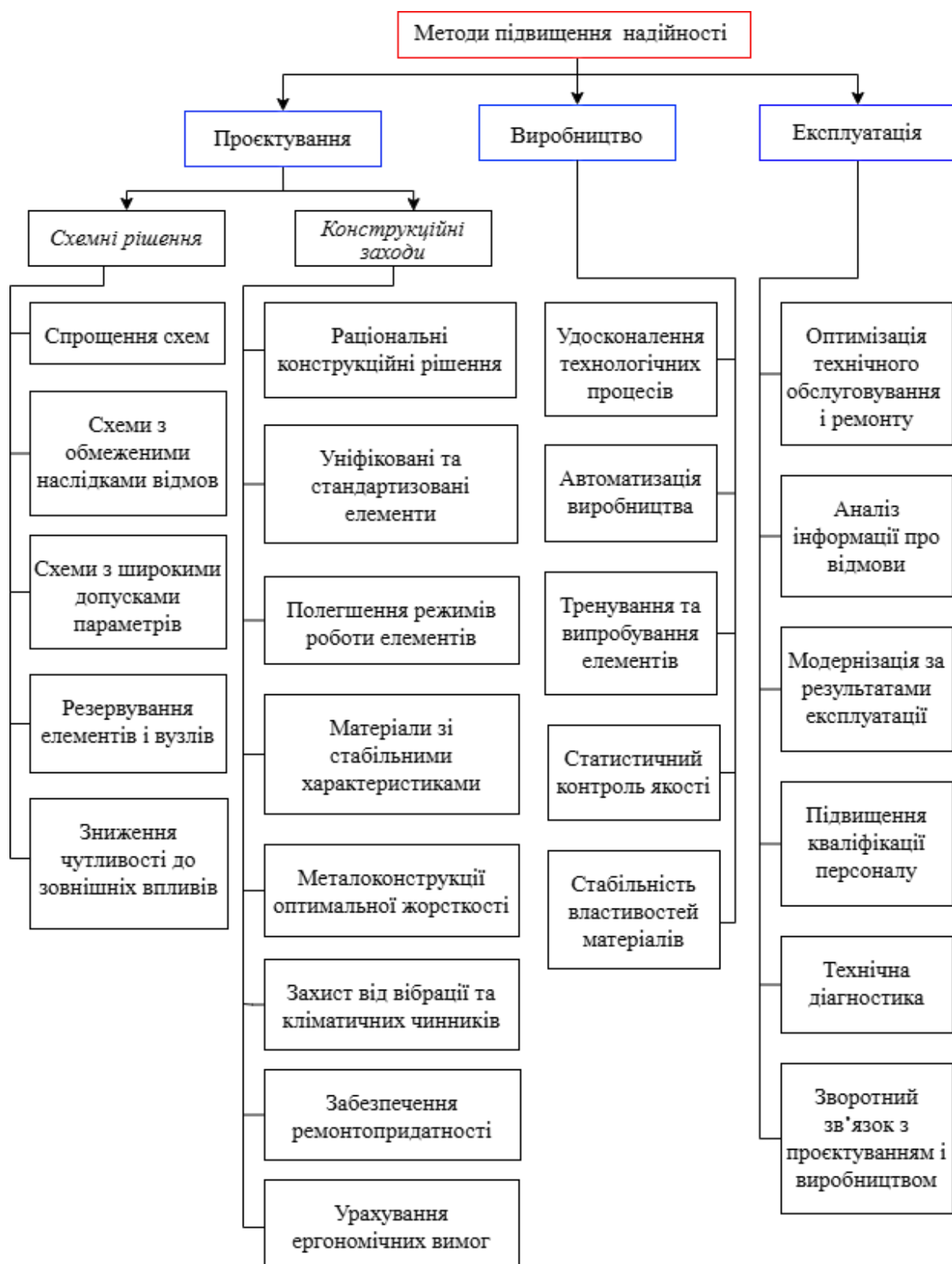


Рис. 12.1. Методи підвищення надійності рухомого складу

Як захисні елементи застосовують швидкодіючі вимикачі, захисні контактори та реле, плавкі запобіжники в системах електроавтоматики, обгінні муфти, а також централізовані системи змащування з терморегулювальними пристроями, що забезпечують працездатність машин за низьких температур.

Загалом технічну систему доцільно проєктувати таким чином, щоб її працездатність зберігалася за достатньо великих відхилень вихідних параметрів окремих елементів і вузлів. Наприклад, застосування пружних муфт замість жорстких дає змогу забезпечити працездатність з'єднувальних валів за більших відхилень від співвісності.

2. Використання високонадійних елементів у конструкції, що створюється. Реалізація цього принципу передбачає застосування уніфікованих і стандартизованих деталей та вузлів, які характеризуються підвищеним рівнем надійності та, як правило, меншою вартістю виготовлення й експлуатації. Використання таких елементів сприяє зменшенню кількості відмов, підвищенню відтворюваності параметрів виробів і спрощенню процесів технічного обслуговування та ремонту, що в цілому позитивно впливає на надійність рухомого складу.

3. Застосування матеріалів з хорошими стабільними характеристиками, що дозволяє зменшити розміри і відповідно масу як окремих деталей, так і виробу в цілому. Велике значення для підвищення міцності має використання матеріалів зі зниженою чутливістю до концентрації напружень. Для деталей, що працюють на терті, застосовують матеріали з високою зносостійкістю (матеріали високої твердості). Для антифрикційних матеріалів дуже важливі припрацьовуваність, змочуваність мастильним матеріалом і можливість самозмащування. Отже, стабільні характеристики застосовуваних матеріалів є важливою умовою забезпечення надійності виробу.

З метою отримання стабільних характеристик матеріалу застосовують різні технологічні методи. Так, для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та жароміцності широке застосування знайшли різні способи зміцнення поверхневого шару деталей. З метою підвищення втомної міцності та зносостійкості використовують: пластичне деформування у вигляді дробеструйної обробки, обкатку кульками та роликами, гідрополірування, алмазне вигладжування, калібрування кулькою, хіміко-термічну обробку у вигляді цементації та азотування, поверхневе гартування, електроіскрове та електродугове зміцнення. Для захисту від корозії використовують хіміко-термічну обробку (наприклад, азотування, силіціювання, сульфідкування), захисне гальванічне

покриття (цинкове, нікелеве і кадмієве), лакофарбові і пластмасові покриття, а також дифузійну металізацію.

4. Застосування металоконструкцій оптимальної жорсткості. Металоконструкції рухомого складу доцільно проєктувати з урахуванням раціонального співвідношення жорсткості та маси, що забезпечує зниження рівня деформацій і напружень у процесі експлуатації. Недостатня жорсткість призводить до збільшення амплітуд коливань і додаткових навантажень на елементи конструкції, тоді як надмірна жорсткість може спричиняти підвищену концентрацію напружень. Забезпечення оптимальної жорсткості металоконструкцій сприяє підвищенню довговічності елементів і зниженню ймовірності виникнення втомних пошкоджень.

5. Захист елементів і вузлів виробу від впливу вібрації, ударних навантажень, запиленості, вологості, низьких і високих температур, біологічних чинників тощо. Ефективний захист елементів і вузлів рухомого складу від впливу зовнішніх факторів забезпечує зниження інтенсивності відмов, пов'язаних із прискореним зношуванням, корозією та порушенням працездатності з'єднань і контактів. Такий захист досягається шляхом застосування амортизовальних і демпфувальних елементів, герметизації вузлів, використання захисних кожухів і покриттів, а також вибору конструктивних рішень, що забезпечують стабільну роботу виробу в заданому діапазоні температур і умов навколишнього середовища.

6. Резервування елементів і вузлів. Резервування є одним із найбільш ефективних способів підвищення надійності, який полягає у введенні додаткових елементів або вузлів, здатних забезпечити працездатність системи у разі відмови одного чи кількох її складових. Іншим шляхом реалізації резервування є полегшення режимів роботи елементів шляхом зниження діючих навантажень і напружень, що істотно зменшує інтенсивність відмов.

Методи підвищення надійності обладнання рухомого складу на стадії проєктування визначаються насамперед схемними та конструкційними рішеннями. Схемні методи підвищення надійності реалізуються за кількома основними напрямками, що зумовлює їх широке застосування при створенні систем різного функціонального призначення. Значення цих методів пояснюється низкою обставин.

По-перше, під час проєктування будь-якої технічної системи конструктор змушений використовувати елементи, що серійно виготовляються промисловістю. Крім того, через обмеження за масою, габаритами, вартістю та іншими показниками не завжди можливо застосувати

елементи з найкращими, з точки зору надійності, характеристиками. У зв'язку з цим однією з найважливіших задач забезпечення надійності є розроблення схем, здатних забезпечити високий рівень працездатності навіть за використання елементів із обмеженою надійністю.

По-друге, на відміну від багатьох інших методів підвищення надійності, схемні рішення не потребують значних організаційно-технічних заходів і суттєвої перебудови виробництва, реалізація яких пов'язана з великими витратами часу. Завдяки цьому схемні методи дають змогу в порівняно короткі терміни підвищити надійність значної кількості систем і пристроїв.

Одним із найскладніших завдань проектування є створення простих за структурою схем. Зменшення складності системи за одночасного підвищення її надійності, як правило, супроводжується зменшенням маси та габаритів, а також підвищенням експлуатаційної надійності. Простота схемного рішення є важливою ознакою високого рівня проектування.

Особливе значення мають схеми з обмеженими наслідками відмов, що застосовуються в системах відповідального призначення. Відмови таких систем доцільно поділяти на відмови з небезпечними наслідками, які можуть призводити до надзвичайних подій, та відмови без небезпечних наслідків. Схемні рішення для систем, що виконують відповідальні функції, слід розробляти таким чином, щоб виключити або максимально обмежити можливість виникнення відмов з небезпечними наслідками.

Резервування належить до числа найбільш перспективних схемних методів підвищення надійності елементів і систем. Його застосування дає змогу створювати системи з дуже високим рівнем надійності. Подальший розвиток малогабаритних елементів електроніки та автоматики створює передумови для широкого впровадження резервування навіть у компактних системах обладнання рухомого складу.

Важливе значення мають також схеми, що забезпечують працездатність за значних допусків на зміну параметрів елементів і зовнішніх впливів. Такі схеми дозволяють зберігати справність системи за умов використання елементів із нестабільними характеристиками, а також у різноманітних умовах експлуатації. Особливо це актуально для систем обробки інформації, у яких коливання напруги живлення або зміни температури і вологості можуть спричиняти приховані відмови, пов'язані з втратою або спотворенням сигналів.

Конструкційні методи підвищення надійності обладнання рухомого складу полягають у створенні надійних елементів, забезпеченні

сприятливих режимів їх роботи, правильному виборі параметрів, уніфікації вузлів і систем, а також у вжитті заходів щодо полегшення технічного обслуговування та ремонту. Надійність елемента значною мірою визначається принципом його побудови: за інших рівних умов більш надійними є елементи, що не містять рухомих частин, ниток розжарювання та тонких обмоток.

Надійність елементів також залежить від їх конструкції, технології виготовлення та умов застосування. Елементи необхідно використовувати лише в режимах, передбачених технічними умовами. Зниження електричних, теплових і вібраційних навантажень істотно зменшує інтенсивність відмов, у ряді випадків – у десятки разів, що зумовлює необхідність максимально можливого полегшення режимів роботи елементів.

Під час проектування електронних і електротехнічних схем доцільно дотримуватися таких рекомендацій: застосовувати елементи з достатніми запасами за електричними параметрами; вибирати мінімально допустимі напруги живлення; забезпечувати сприятливий тепловий режим; приділяти особливу увагу захисту апаратури від ударних навантажень і вібрації. Правильна амортизація у багатьох випадках є визначальним чинником надійності апаратури.

Під час проектування також необхідно враховувати зміну параметрів матеріалів і елементів з часом, тобто їх старіння. Це положення є обов'язковим як для систем безперервної дії, так і для систем, що працюють короткочасно. Розкид параметрів елементів наприкінці терміну служби або зберігання, як правило, істотно перевищує їх початковий розкид, що повинно враховуватися під час вибору схемних і конструкційних рішень.

Важливою складовою проєктованих систем є контрольно-вимірвальне обладнання. Вбудовані засоби контролю забезпечують автоматичну перевірку справності системи і, за можливості, сигналізацію місця виникнення відмови, що сприяє скороченню часу її виявлення та усунення. Питання забезпечення ремонтпридатності конструкцій детально розглянуто в підрозділі 6.4.

12.2. Технологічні шляхи підвищення надійності рухомого складу

Найчастіше відмови технічних систем зумовлені наявністю в їх складі елементів зі прихованими дефектами, тобто таких, що відрізняються між собою за рівнем якості та властивостей. Для рухомого складу це особливо критично, оскільки навіть незначна неоднорідність окремих деталей або вузлів у серійному виробництві з часом трансформується у підвищену інтенсивність відмов у процесі експлуатації. Саме тому ключовим завданням виробництва є реалізація комплексу заходів, спрямованих на підвищення однорідності продукції, що безпосередньо означає підвищення її надійності.

На стадії виготовлення рухомого складу та його складових такі заходи насамперед пов'язані з удосконаленням технологічних процесів. Йдеться не лише про модернізацію обладнання або автоматизацію окремих операцій, а й про оптимізацію режимів обробки, зменшення технологічних розсіювань параметрів, стабілізацію умов виконання операцій та впровадження технологічної дисципліни. Саме технологія виробництва значною мірою визначає, чи буде закладений у конструкцію потенціал надійності реалізований на практиці.

Удосконалення технології виробництва є складовою загального науково-технічного прогресу, який у більшості галузей машинобудування, зокрема залізничного, має поступовий і еволюційний характер. Технологічні зміни, як правило, ґрунтуються не тільки на новітніх наукових розробках, але й на систематичному узагальненні досвіду серійного виробництва та експлуатації рухомого складу. Аналіз причин відмов, статистика дефектів і результати експлуатаційних спостережень стають важливими джерелами інформації для коригування технологічних рішень.

Важливою умовою досягнення технологічної однорідності продукції є охоплення всіх стадій виробничого процесу – від отримання сировини до остаточного складання та регулювання систем. Надійність не може бути «додана» на завершальному етапі виробництва: вона формується послідовно на кожному технологічному переході. Особливу увагу при цьому необхідно приділяти виготовленню та відбору вихідних матеріалів і напівфабрикатів, оскільки стабільність і однорідність їх властивостей є базою для забезпечення надійності елементів рухомого складу, виготовлених із цих матеріалів. Саме на цьому рівні зак-

ладається потенційна довговічність, безвідмовність і ремонтпридатність майбутніх вузлів і агрегатів.

Особливо критичним з погляду формування надійності є етап складання механічних вузлів і регулювання схем, оскільки саме на цій стадії найчастіше виникають передумови майбутніх відмов. Для рухомого складу це проявляється у вигляді прихованих технологічних дефектів: перекосів під час складання, локальних перенапружень у деталях, неправильних зазорів, нестабільних контактів або помилок регулювання. Такі потенційні відмови, як правило, не виявляються під час приймального контролю і проявляються лише в процесі тривалої експлуатації, що істотно ускладнює їх діагностування та усунення.

З огляду на це виняткового значення набуває комплекс організаційно-технологічних заходів, спрямованих на підвищення уважності, точності та повторюваності дій складальників і налагоджувальників. Вирішальну роль тут відіграють не лише кваліфікація персоналу та дотримання технологічних інструкцій, а й умови праці: достатнє та рівномірне освітлення, раціональне кольорове оформлення виробничих приміщень, зниження рівня шуму, впорядкованість робочого місця. Не менш важливим є психофізіологічний стан працівників, оскільки втома, монотонність операцій або підвищене навантаження безпосередньо впливають на ймовірність допущення прихованих помилок складання.

Суттєвим технологічним резервом підвищення надійності є автоматизація виробничих операцій, яка дозволяє мінімізувати вплив людського чинника. Так, традиційні ручні операції пайки доцільно замінювати пайкою зануренням у ванну з розплавленим припоєм, що забезпечує стабільність з'єднань і однакову якість контактів. Аналогічно, ручну намотку трансформаторів та котушок ефективно замінюють автоматизованими процесами з контрольованим і рівномірним натягом проводу, унаслідок чого різко зменшується кількість обривів і пошкоджень ізоляції. У масштабах серійного виробництва рухомого складу та його електричного обладнання така автоматизація забезпечує високу однорідність параметрів, а отже – і підвищений рівень надійності виробів.

У цілому виділяють два основні напрями повної автоматизації виробництва апаратури та систем. Перший передбачає використання існуючих технологічних методів, коли традиційні елементи та вузли монтуються у блоки за допомогою автоматизованих засобів без принципової зміни конструкції. Другий напрям пов'язаний із застосуванням нових схемних елементів і принципово нових технологічних прийомів, що дає змогу не лише автоматизувати складання, а й радикально зменшити кількість потенційно ненадійних з'єднань та регулювальних

операцій. Саме цей підхід є найбільш перспективним з позицій довгострокового підвищення надійності сучасного рухомого складу.

Важливим технологічним способом підвищення однорідності продукції є тренування елементів і систем, що по суті реалізує вибраковування так званих «слабких» елементів ще до початку експлуатації. Для рухомого складу та його складових це означає цілеспрямоване виявлення вузлів і деталей із прихованими дефектами, які можуть зумовити ранні відмови. Окрім звичайного тренування в умовах, максимально наближених до експлуатаційних, у виробничій практиці застосовують і жорстке тренування з підвищеними навантаженнями.

Застосування жорсткого тренування дає змогу істотно скоротити тривалість цього етапу, однак водночас ускладнює вибір раціональних режимів і строків його проведення. Параметри тренування мають бути підібрані таким чином, щоб забезпечити повне усунення елементів із прихованими дефектами і водночас не погіршити якість справних елементів. Для систем рухомого складу це має принципове значення, оскільки надмірні навантаження на стадії виготовлення можуть негативно вплинути на подальшу довговічність і ресурс.

Істотну роль у підвищенні однорідності продукції відіграє статистичне регулювання якості. Його ідея ґрунтується на поділі причин відхилення якості продукції на випадкові та не випадкові. Випадкові причини неминуче присутні в будь-якому виробництві, їхній вплив зазвичай незначний і слабо залежить від дій персоналу. Невипадкові причини, навпаки, становлять невелику частку, проте саме вони пов'язані з порушеннями технології, несправностями обладнання або організаційними недоліками й можуть бути усунені цілеспрямованими заходами.

З огляду на це в умовах стабільного виробництва допускається наявність лише випадкових причин розсіювання параметрів, тоді як поява не випадкових причин розглядається як сигнал для негайного втручання. Таким чином, статистичне регулювання якості, з одного боку, передбачає статистичне виявлення не випадкових причин і реалізацію заходів щодо їх усунення, а з іншого – контроль випадкових коливань параметрів шляхом спостереження за сталістю узаконеного (встановленого в нормативній документації) розсіювання якості.

Практично це реалізується за допомогою контрольних діаграм, на яких фіксуються середні значення контролюваного параметра та його середньоквадратичне відхилення. Розташування точок на контрольній діаграмі відносно контрольних меж (рис. 12.2) дає змогу оцінити стійкість виробничого процесу в часі та своєчасно вжити коригувальних

заходів, не допускаючи переходу технологічних відхилень у зниження надійності елементів і систем рухомого складу.

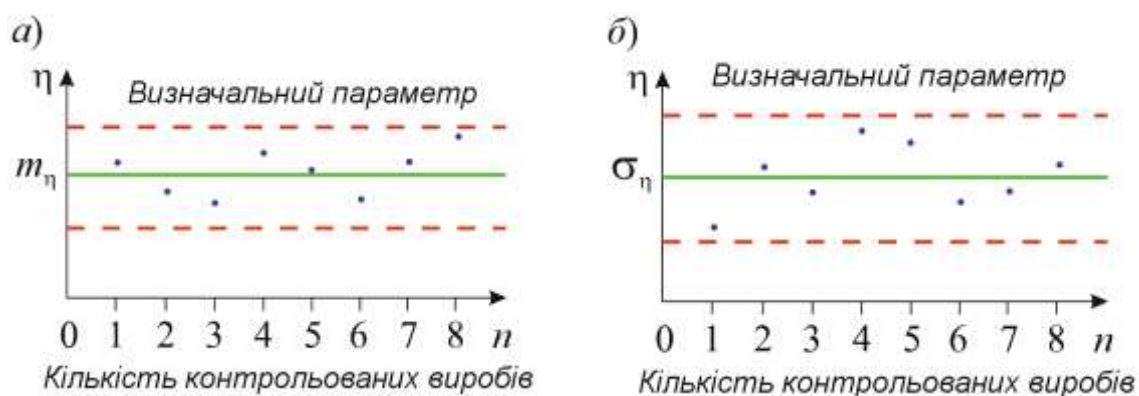


Рис. 12.2. Контрольна діаграма (карта):

- а) точкова контрольна діаграма для середніх значень параметру;
- б) точкова контрольна діаграма для середніх квадратичних відхилень параметру

У сучасній практиці статистичного контролю якості та технічного діагностування широко застосовуються контрольні діаграми Шухарта, що реалізуються у цифрових SPC-системах і забезпечують оперативне виявлення нестабільності технологічних процесів.

Зв'язок параметрів технологічного процесу з показниками надійності виробу. Технологічний процес виготовлення, складання та контролю виробу повинен за мінімальних витрат часу й ресурсів забезпечувати заданий рівень якості продукції, зокрема й її надійності. Для рухомого складу це означає, що технологія має не лише гарантувати відповідність геометричних, міцнісних та електричних параметрів установленим нормам, а й створювати передумови для стабільної безвідмовної роботи виробу впродовж усього життєвого циклу. Водночас зв'язок між параметрами технологічного процесу та надійністю готового виробу є багатофакторним і непрямим, а вимоги до надійності нерідко вступають у суперечність із такими базовими вимогами до технології, як її продуктивність і економічна ефективність.

На практиці технологу складно надати негайне й переконливе обґрунтування окремих заходів, спрямованих на підвищення надійності, оскільки позитивний ефект від їх упровадження, як правило, проявляється лише через значний проміжок часу та часто вже на стадії експлуатації, тобто поза межами безпосередньої діяльності підприємства-виробника. Це призводить до недооцінювання ролі технологічних фак-

торів у формуванні надійності та до домінування короткострокових економічних критеріїв під час ухвалення виробничих рішень.

Разом із тим саме організація виробництва, застосовувані технологічні процеси, рівень їх стабільності та прийняті методи контролю якості чинять вирішальний вплив на показники надійності виробів рухомого складу. Від вибору матеріалів, режимів обробки, точності складання та ефективності технологічного контролю залежить розсіювання параметрів елементів, імовірність появи прихованих дефектів і, зрештою, інтенсивність відмов у процесі експлуатації.

Загальну залежність показників надійності від рівня досконалості технологічного процесу доцільно подати у вигляді узагальнювальної схеми, що відображає вплив основних технологічних чинників на формування надійності виробу (рис. 12.3). Така схема наочно демонструє, що підвищення надійності є результатом системної взаємодії технології виготовлення, складання та контролю, а не окремих локальних заходів.



Рис. 12.3. Вплив технологічного процесу на формування показників надійності

Усі складові технологічного процесу – метод обробки та застосовуване обладнання, послідовність операцій, режими обробки, методи контролю – визначають його вихідні параметри і передусім показники якості виробу, які задаються конструктором у технічних умовах. До таких показників належать точність виготовлення, якість поверхні, механічні властивості матеріалу та інші характеристики, що формально фіксуються під час приймального контролю.

Питанням встановлення взаємозв'язків між показниками технологічного процесу та його вихідними параметрами присвячені дисципліни «Технологія ремонту», «Організація і планування виробництва»

та низка інших навчальних курсів. Однак для розв'язання задач надійності рухомого складу цього, як правило, недостатньо. Показники надійності пов'язані не безпосередньо з вихідними параметрами технологічного процесу, а з експлуатаційними властивостями виробу – його зносостійкістю, втомною міцністю, корозійною стійкістю, теплостійкістю тощо, які проявляються вже на стадії тривалої роботи в реальних умовах експлуатації.

Залежність експлуатаційних властивостей виробу від показників якості готової продукції є складною та багатфакторною з кількох причин. По-перше, процес втрати працездатності, маючи певну фізичну природу (зношування, втомне руйнування, корозійні процеси), підпорядковується закономірностям випадкових процесів, що зумовлено змінністю умов експлуатації рухомого складу та нестабільністю окремих параметрів технологічного процесу. Саме ця стохастичність зумовлює розсіювання ресурсу та часу безвідмовної роботи навіть для однотипних виробів.

По-друге, через складність більшості сучасних технологічних процесів виготовлення і ремонту та наявність побічних фізико-хімічних і структурних явищ часто важко однозначно виділити всі параметри процесу, які дійсно істотно впливають на експлуатаційні властивості виробу. У результаті окремі технологічні чинники можуть залишатися «прихованими», але саме вони згодом визначають рівень надійності вузлів і агрегатів рухомого складу в умовах реальної експлуатації.

Розкриття залежностей між якістю виробу та його експлуатаційними властивостями ґрунтується на вивченні фізичних процесів руйнування матеріалів. Саме аналіз механізмів зношування, втомного пошкодження, корозійних і термічних процесів дає змогу пояснити, яким чином параметри, сформовані на стадії виготовлення, трансформуються в експлуатаційні властивості виробів рухомого складу.

Отже, технологічний процес справляє безпосередній і суттєвий вплив на показники надійності, хоча ці зв'язки є складними, багатоступеневими та не завжди очевидними. Вони реалізуються через ланцюг проміжних характеристик – від параметрів обробки й складання до структури матеріалу, стану поверхонь і внутрішніх напружень, які визначають поведінку виробу в умовах експлуатації.

Досконалість технологічного процесу значною мірою визначає досягнутий рівень надійності виробу, оскільки саме в процесі виготовлення фактично реалізується надійність, закладена конструктором. У цьому сенсі технологічні методи забезпечення надійності мають таке саме принципове значення, як і конструкційні та експлуатаційні. Вод-

ночас роль технології в проблемі надійності досі не завжди окреслена достатньо чітко. Аналіз наукових досліджень і практичних розробок у галузі підвищення надійності за рахунок удосконалення технології свідчить, що часто відсутнє однозначне уявлення про коло завдань, які саме має розв'язувати технологія в цьому напрямі.

Оскільки будь-який розвиток і вдосконалення технологічного процесу в підсумку приводить до створення більш досконалих машин і вузлів рухомого складу, важливо визначити межу між загальними технологічними проблемами та власне технологічними проблемами надійності. Це потребує відповіді на принципове запитання: який критерій слід використовувати для встановлення зв'язку між технологією та надійністю виробу.

Для розв'язання цього питання необхідно проаналізувати причини відмов, зумовлені недосконалістю технологічних процесів. Саме такі відмови слугують об'єктивним критерієм для визначення основних напрямів розроблення й удосконалення технологічних процесів, які мають забезпечити заданий рівень надійності виробів, що випускаються, зокрема елементів і систем рухомого складу залізниць.

Відмови, пов'язані з технологією виготовлення виробів. Усі відмови виробу тією чи іншою мірою пов'язані з технологією, оскільки саме вона визначає рівень якості та сукупність властивостей, сформованих у процесі виготовлення і складання. Для рухомого складу це означає, що технологічні рішення безпосередньо впливають на структурний стан матеріалів, точність сполучення деталей, рівень внутрішніх напружень і стабільність параметрів, які згодом визначають експлуатаційну надійність.

Водночас частина відмов може бути віднесена до недопустимих, тобто таких, за яких характер відмови або швидкість перебігу процесу пошкодження не відповідають установленим для виробу вимогам. У практиці експлуатації рухомого складу це проявляється у вигляді передчасних відмов, інтенсивного зносу або раптових руйнувань, що не узгоджуються з нормативним ресурсом і допустимими показниками безвідмовності.

Недопустимі відмови є, як правило, наслідком недосконалості технологічного процесу або його невідповідності вимогам щодо заданого рівня надійності. Йдеться про помилки у виборі режимів обробки, порушення послідовності операцій, недостатню стабільність технології, а також про неефективні або формальні методи технологічного контролю. Саме ці чинники створюють передумови для появи прихованих дефектів, які реалізуються у відмови на стадії експлуатації.

Класифікацію причин, що зумовлюють недопустимі відмови, пов'язані з недосконалістю технологічних процесів, наведено на рис. 12.4.



Рис. 12.4. Класифікація відмов, зумовлених недосконалістю технологічних процесів

Ця класифікація дає змогу систематизувати технологічні чинники відмов і слугує методичною основою для визначення пріоритетних напрямів удосконалення технології з метою підвищення надійності виробів рухомого складу. У літературних джерелах такі відмови часто позначають як відмови, пов'язані з недосконалістю технологічних процесів, причини яких формуються на стадії виготовлення, а проявляються під час експлуатації.

Перша група причин пов'язана з необґрунтованістю технічних умов (ТУ) на параметри виробу та допуски його елементів, недосконалістю технологічної документації, а також недоліками методів випробувань на надійність готового виробу і його механізмів. Технічні умови мають відображати основні вимоги до надійності. Водночас на практиці трапляються численні випадки, коли конструктивно однакові вироби, виготовлені у точній відповідності до ТУ, демонструють різні

показники надійності, якщо вони вироблені різними технологічними методами. Це пояснюється тим, що ТУ часто не охоплюють усіх чинників, які визначають надійність, і не враховують нові властивості, що формуються у виробі в процесі виготовлення. Зв'язки між технологічним процесом і експлуатаційними властивостями зазвичай складні та не завжди повністю виявлені.

Типовим прикладом є вплив технологічного процесу механічної обробки на стан поверхневого шару деталей. Саме технологія визначає геометричні та фізико-хімічні параметри поверхневого шару – шорсткість і топографію поверхні, твердість, рівень і знак залишкових напружень, структурний стан матеріалу та інші показники. Ці параметри, своєю чергою, безпосередньо формують експлуатаційні властивості – зносостійкість і втомну міцність. Проте технічні умови, як правило, не нормують більшість параметрів поверхневого шару, обмежуючись зазначенням шорсткості та інколи мікротвердості. Часто також не регламентуються послідовність і структура операцій, режими обробки та вибір методів обробки, які визначаються переважно з міркувань продуктивності. Унаслідок цього різні технологічні процеси можуть приводити до виготовлення деталей із різним рівнем надійності.

Чим вищі вимоги до надійності виробів, тим більша кількість параметрів має бути чітко зафіксована в ТУ, а також тим достовірніше повинні бути встановлені основні взаємозв'язки між експлуатаційними та технологічними параметрами. Важливо, щоб методи випробувань забезпечували коректну оцінку рівня надійності. За відсутності такої оцінки або за її недостатньої достовірності невиявлені властивості можуть призвести до передчасних відмов. Складність розроблення методів і засобів випробувань на надійність зумовила виділення цього напрямку в самостійну галузь проблеми надійності.

Друга група причин недопустимих відмов, обумовлених технологією, пов'язана з недостатньою надійністю самого технологічного процесу. Технологічний комплекс є складною динамічною системою з великою кількістю взаємозв'язків і характеризується множиною вихідних параметрів. Для забезпечення випуску якісної та надійної продукції така система сама має бути надійною, що визначається рівнем досконалості та стабільності технологічного процесу, ефективністю методів контролю та іншими організаційно-технічними чинниками.

Третя група причин виникнення недопустимих відмов пов'язана з залишковими та побічними явищами, породженими технологічним процесом. Сучасні технології виготовлення – від обробки заготовок до фінішних операцій – зазвичай супроводжуються значними силовими й

температурними впливами на деталі за високих вимог до точності та продуктивності. Витрати енергії, необхідні для реалізації процесу, зумовлюють низку побічних явищ: зміну властивостей матеріалу, формування залишкових напружень, спотворення структури та появу дефектів різної природи.

Для цілеспрямованого усунення зазначених причин необхідно встановити надійні кількісні взаємозв'язки між технологічними та експлуатаційними параметрами виробів, що є методичною основою розроблення технологій, здатних забезпечити заданий рівень надійності елементів і систем рухомого складу.

Вплив параметрів технологічного процесу на зносостійкість поверхонь. Показники якості виготовлення виробів, що є наслідком прийнятого технологічного процесу, безпосередньо впливають на таку ключову експлуатаційну властивість, як зносостійкість поверхні. Для елементів рухомого складу саме стан поверхонь тертя визначає інтенсивність зношування, стабільність роботи сполучень і тривалість ресурсу.

По-перше, на зносостійкість істотно впливають хімічний склад, структура та механічні характеристики матеріалів, які формуються в результаті металургійних або інших процесів одержання матеріалу, а також у процесі термічної й термохімічної обробки поверхонь. Вибір марки матеріалу та режимів його обробки визначає твердість, структуру поверхневого шару й опір зношуванню в умовах контактної взаємодії.

По-друге, зносостійкість значною мірою залежить від геометричних і фізико-хімічних параметрів поверхневого шару. Відхилення форми деталей збільшують тривалість періоду макроприработки, тоді як шорсткість поверхні визначає перебіг періоду мікроприработки. У процесі нормального зношування в зоні контакту встановлюється оптимальна шорсткість, яка відповідає конкретним умовам роботи сполучення (навантаженню, швидкості, режиму змащування). Саме тому однакові за номінальними розмірами деталі, але виготовлені різними технологічними методами, можуть мати різну зносостійкість і, відповідно, різний ресурс.

Слід ураховувати, що зв'язки між технологічними та експлуатаційними параметрами мають стохастичну природу, що зумовлено розсіюванням складу матеріалу, змінами положення деталі під час обробки, коливаннями жорсткості технологічної системи та іншими чинниками, які визначають точність і стабільність процесу обробки. Унаслідок цього навіть за формально однакових технологічних умов показники зносостійкості можуть істотно розсіюватися, що необхідно враховува-

ти під час оцінювання надійності та прогнозування ресурсу елементів рухомого складу.

На рис. 12.5 подано схему впливу розсіювання деякого параметра виробу X , сформованого внаслідок даного технологічного процесу, на швидкість руйнування (зношування) v , яка пов'язана з цим параметром функціональною залежністю $v = f(X)$, тобто є функцією випадкового аргументу. Для елементів рухомого складу це означає, що навіть за однакової конструкції швидкість деградаційних процесів може істотно змінюватися через технологічне розсіювання параметрів.

Як приклад можна навести багато видів зношування поверхонь, для яких параметром виробу, що визначає швидкість зношування v , є твердість матеріалу $X = H_v$. У спрощеному вигляді між цими величинами встановлюється залежність $v = k / H_v$, де k – коефіцієнт, що залежить від матеріалу та умов зношування. За такого зв'язку розсіювання значень твердості матеріалу неминуче призводить до відповідного розсіювання швидкостей зношування. Якщо при цьому допускається виготовлення виробів з низькими значеннями параметра X_n , то такі вироби матимуть недопустимо високу швидкість зношування v_n , що може зумовити передчасну відмову.

Очевидно, що підвищення стабільності технологічного процесу та контроль недопущення виготовлення виробів із параметрами нижчими за $X_{\min}$ сприяють випуску надійної продукції. Проте на практиці ця задача значно складніша, ніж здається на перший погляд.

По-перше, функціональна залежність між параметром X і швидкістю процесу руйнування часто є невідомою або має стохастичний характер. У зв'язку з цим допуски на відповідний параметр зазвичай установлюють досить умовно – переважно на підставі досвіду експлуатації виробів даного типу, а не на основі строгої фізичної моделі.

По-друге, на величину v , як правило, впливає не один, а кілька технологічних параметрів, причому далеко не всі з них підлягають безпосередньому контролю. Так, на швидкість (інтенсивність) зношування

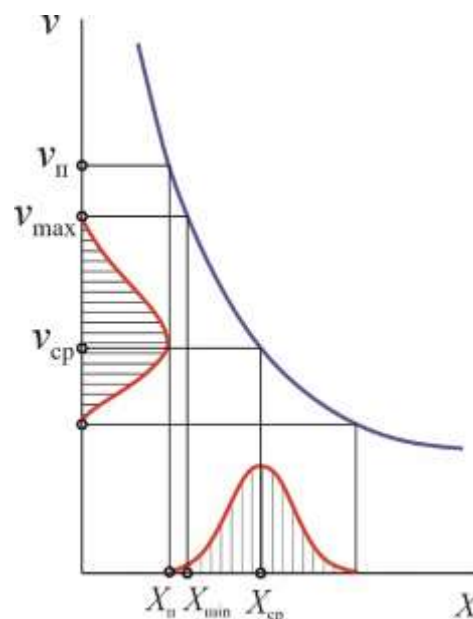


Рис. 12.5. Залежність швидкості руйнування (зношування) від параметра X , сформованого технологічним процесом

незмащуваних шорстких поверхонь впливає не лише твердість матеріалу H_v , а й характеристика шорсткості поверхні $(b + 1) \operatorname{tg} \alpha$, де b – показник опорної поверхні (для різних класів шорсткості зазвичай лежить у межах від 1,2 до 2), а α – кут нахилу нерівностей. У цьому випадку параметр X , що визначає швидкість зношування v , залежить уже від кількох (у наведеному прикладі – трьох) технологічних чинників: $X = H_v (b + 1) \operatorname{tg} \alpha$.

Під час виготовлення деталей значення $\operatorname{tg} \alpha$, як правило, не контролюється. Навіть за умови такого контролю дисперсія параметра X залишається значною, оскільки вона формується як результат розсіювання трьох випадкових аргументів. Унаслідок цього зростає імовірність виготовлення деталей із недопустимими значеннями $v_{\text{п}}$. Реальна ситуація, характерна для виробництва складних виробів рухомого складу, полягає в тому, що кількість контрольованих параметрів менша за кількість чинників, які реально впливають на надійність, а допуски на технологічні параметри є значною мірою умовними і лише наближено відображають їх зв'язок із показниками надійності.

За таких умов одним з основних шляхів випуску надійних виробів є забезпечення надійності самого технологічного процесу, а також створення запасу в значеннях параметрів, що визначають працездатність виробу. Саме цей підхід дає змогу компенсувати стохастичний характер технологічних і експлуатаційних чинників та зменшити імовірність передчасних відмов.

Вплив параметрів технологічного процесу на втомну міцність деталей. На втомну міцність деталей істотно впливають як властивості матеріалу, так і стан поверхневих шарів та наявність дефектів, сформованих у процесі виготовлення. Зокрема, розтягувальні залишкові напруження, що виникають у поверхневому шарі під час механічної обробки, зазвичай знижують межу витривалості, тоді як стискувальні залишкові напруження, навпаки, можуть підвищувати міцнісні характеристики. Такий вплив особливо відчутний для деталей рухомого складу, що працюють за знакозмінних навантажень і підвищених температур. Тому для них принципово важливим є вибір оптимального технологічного процесу, який забезпечує необхідні фізичні параметри поверхневого шару.

Відомо також, що параметри шорсткості поверхні мають суттєвий вплив на опір втоми. У загальному випадку межа втоми зростає зі зниженням шорсткості та поліпшенням якості поверхневого шару. Крім того, істотне значення має напрям слідів обробки: за їх орієнтації вздовж напряму дії головного напруження межа втоми, як правило, є

вищою. Фінішна обробка поверхні, яка значною мірою визначає конфігурацію мікроскопічних рисок і механічні властивості поверхневого шару, може суттєво впливати на межу витривалості навіть за однакового класу шорсткості.

Так, результати випробувань на витривалість зразків зі сталей P18 і 9ХМФІ9Х, оброблених алмазним та звичайним шліфуванням, свідчать, що опір втомному руйнуванню при шліфуванні кругами з синтетичних алмазів зростає на 20–45 % за контактних навантажень і до 30 % – за згину. Це пояснюється особливостями рельєфу поверхні: кількість рисок на одиницю площі та їх глибина при алмазному шліфуванні істотно менші, ніж при абразивному, унаслідок чого поверхневий рельєф стає більш згладженим і сприятливим з погляду втомної міцності.

Узагальнено вплив залишкових напружень поверхневого шару та орієнтації слідів механічної обробки на межу витривалості деталей показано на рис. 12.6.

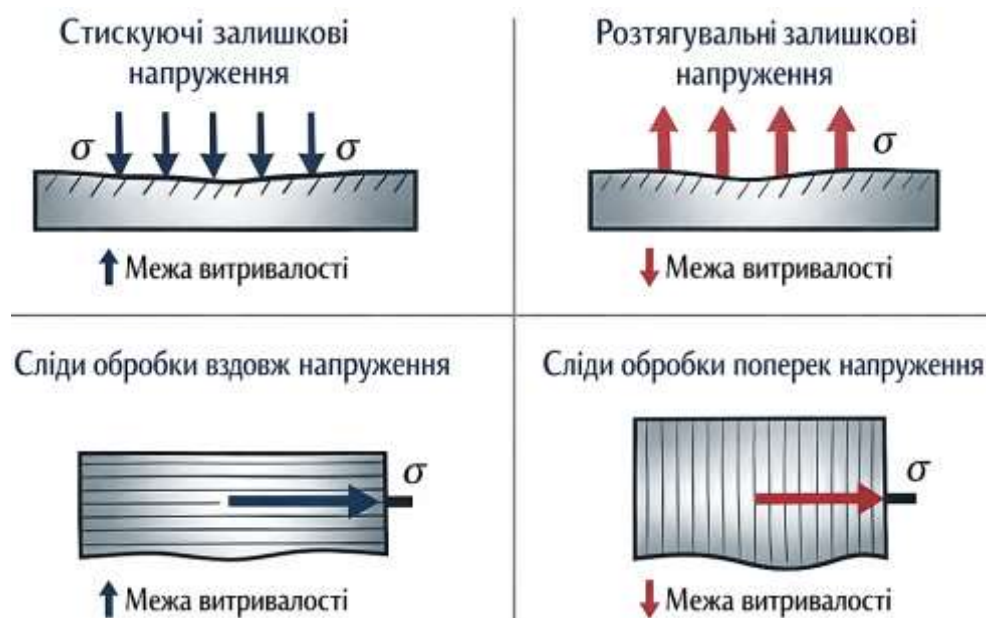


Рис. 12.6. Вплив залишкових напружень поверхневого шару та орієнтації слідів обробки на межу витривалості деталей

Вплив параметрів технологічного процесу на корозійну стійкість виробів. Для захисту металів від корозії у виробництві широко застосовують різні види покриттів – електролітичні, хімічні, полімерні та їх комбінації. Корозійна стійкість покриттів як експлуатаційна властивість виробів, що працюють в агресивних середовищах, визнача-

ється не лише типом покриття, а й режимами його нанесення, умовами реалізації технологічного процесу, а також можливістю регулювання та контролю перебігу цього процесу.

Корозійна стійкість тісно пов'язана з такими показниками як суцільність покриття, однорідність його складу та стабільність товщини по поверхні виробу. Порушення будь-якого з цих показників створює локальні осередки корозійного ураження, що особливо небезпечно для елементів рухомого складу, які експлуатуються в умовах підвищеної вологості, дії солей, нафтопродуктів або агресивних атмосфер.

Під час нанесення полімерних покриттів їх часто виконують багат шаровими. У такому разі технологічний процес характеризується широким діапазоном режимів обробки, що може призводити до істотного розсіювання початкових параметрів виробів і до значної залежності корозійної стійкості від конкретних технологічних умов формування кожного шару. Це ускладнює забезпечення стабільної якості покриттів у серійному виробництві.

Ще складніші технологічні завдання виникають під час застосування покриттів, які, крім корозійної стійкості, повинні одночасно забезпечувати зносостійкість або підвищену опірність втомному руйнуванню. У таких випадках технологія формування покриття безпосередньо впливає на комплекс експлуатаційних властивостей і потребує компромісу між різними вимогами до поверхневого шару.

Інтенсивні корозійні руйнування характерні для конструкцій, що працюють у рідких середовищах, які спричиняють електрохімічну корозію. Особливо небезпечним видом пошкодження є корозійне розтріскування, яке виникає за одночасної дії корозійного середовища та статичних або повторно-статичних навантажень. У цьому разі властивості металу, що визначають його чутливість до корозійного впливу середовища, безпосередньо пов'язані з параметрами технологічного процесу виготовлення.

Технологічні операції, що застосовуються під час виготовлення виробу, можуть істотно знизити початкову термодинамічну та електрохімічну стійкість металу внаслідок появи структурної неоднорідності, формування напружено-деформованого стану, а також зміни фізичних і механічних властивостей. Так, для зварних з'єднань і зварних конструкцій визначальними є теплофізичні та хіміко-металургійні впливи зварювального процесу.

Вирішальний вплив на інтенсивність корозійного розтріскування має якість зварного з'єднання та відсутність дефектів зварного шва. Корозійне розтріскування може бути попереджене шляхом зниження

або зняття залишкових напружень, зокрема за допомогою механічного деформування або інших технологічних прийомів післязварювальної обробки.

У цілому послідовність технологічних операцій, застосовувані методи та режими обробки безпосередньо впливають не лише на корозійну стійкість, а й на зносостійкість, міцність, теплостійкість, стабільність механічних і фізичних властивостей та інші експлуатаційні показники виробів. Саме тому технологічний процес слід розглядати як один із ключових чинників забезпечення надійності елементів і систем рухомого складу.

Виникнення дефектів у виробках у процесі технологічного виготовлення. У процесі виготовлення виробів на заготовки та матеріали діють значні силові, теплові, хімічні та інші впливи, які супроводжують будь-який технологічний процес і створюють об'єктивні умови для появи небажаних відхилень. До таких відхилень належать утворення пор і раковин, зміна початкових властивостей матеріалів, а також успадкування вихідних похибок виготовлення. Відповідно до ДСТУ 2860-94, дефектом називають кожне окреме невиконання встановленої вимоги, визначеної нормативною, конструкторською або технологічною документацією. Отже, до дефектів належать як відхилення властивостей і стану матеріалів (тріщини, раковини, включення, структурні зміни, дислокації), так і невиконання встановлених вимог до поверхневих шарів виробів. Водночас відхилення форми та розмірів оброблених деталей зазвичай розглядають окремо – як похибки обробки, тоді як власне дефекти пов'язані з порушенням вимог до матеріалу та стану поверхні.

Слід підкреслити принципову відмінність між цими поняттями: дефекти формуються на стадії виготовлення або ремонту виробу, тоді як пошкодження є наслідком його експлуатації. Таке розмежування має принципове значення для аналізу причин відмов і вибору ефективних заходів щодо підвищення надійності рухомого складу.

Утворення дефектів залежить від характеру технологічного процесу, його режимів, застосовуваних методів контролю параметрів, ступеня автоматизації та інших організаційно-технічних чинників. Для кожного технологічного процесу, як правило, існують типові види дефектів, зумовлені порушенням перебігу процесу або несприятливим поєднанням окремих впливів.

Так, під час лиття деталей унаслідок нерівномірного охолодження, окиснення, потрапляння в метал газів і неметалевих включень можуть виникати дефекти у вигляді тріщин, раковин, пор, ліквіації (неоднорід-

ності хімічного складу) та структурної неоднорідності. Одночасно формуються внутрішні напруження, які можуть призводити до короблення деталей і повільної зміни їх конфігурації в процесі експлуатації.

Аналогічні дефекти можливі й під час зварювання, для якого характерна локалізація дефектів у зоні шва та навколошовній області. Додаткові дефекти виникають унаслідок взаємодії основного металу виробу з наплавленим металом. Згідно з рекомендаціями Міжнародного інституту зварювання, дефекти з'єднань, отриманих зварюванням плавленням, поділяють на шість основних груп: тріщини різного походження; раковини й газові пори; тверді неметалеві та металеві вclusions; недостатнє проплавлення і знижена міцність з'єднання; дефекти форми зварного шва; інші поверхневі та внутрішні дефекти.

Під час термічної та хіміко-термічної обробки металів і сплавів відбуваються складні фізико-хімічні процеси, унаслідок яких можуть виникати як явні дефекти (загартувальні тріщини, окиснення), так і невиконання вимог до структури та твердості. Крім того, у кристалічній ґратці під час фазових і структурних перетворень формуються специфічні дефекти (дислокації, вакансії), що знижують міцнісні характеристики металу і суттєво залежать від режимів термообробки.

Особливо істотний вплив на працездатність виробів має механічна обробка, яка формує остаточну геометрію деталей і стан їх робочих поверхонь. Обробка різанням супроводжується пластичними деформаціями, наклепом і нагріванням поверхневого шару, унаслідок чого формується поверхневий шар зі специфічними фізичними властивостями, зумовленими вибраним методом обробки та його режимами.

Навіть за однакового технологічного процесу вирішальну роль у виникненні дефектів відіграють режими та умови обробки, а також можливості керування перебігом процесу. Тому забезпечення стабільності технологічних процесів і ефективного контролю їх параметрів є необхідною умовою підвищення надійності виробів рухомого складу.

Вплив параметрів технологічного процесу на виникнення дефектів. Характер технологічного процесу та його параметри, як правило, істотно впливають на стан матеріалу виробу, за якого можливе виникнення дефектів. У кожному технологічному процесі, залежно від його фізичної природи, закладені передумови для появи або локалізації певних відхилень від ідеального чи регламентованого стану матеріалу. Саме ці відхилення, за виходу за встановлені межі, розглядаються як дефекти відповідно до вимог нормативної документації.

У межах одного й того самого методу обробки вирішальний вплив на імовірність виникнення дефектів зазвичай мають режими обробки.

Так, під час шліфування існує небезпека утворення припалів – локальних змін структури поверхневого шару металу, що є наслідком високих миттєвих температур у зоні різання. У зоні припалу відбуваються структурні перетворення, зокрема відпуск металу або загартування з відпуском, змінюється мікротвердість і формуються залишкові напруження. Для кожного матеріалу існує температура припалоутворення $\theta_{\text{п}}$, і якщо температура шліфування $\theta_{\text{ш}}$ не перевищує цього значення ($\theta_{\text{ш}} < \theta_{\text{п}}$), припали не виникають. Крім того, слід ураховувати, що на поверхні зберігаються лише ті припали, глибина яких перевищує припуск на шліфування. Температура, що визначає припалоутворення, у свою чергу залежить від режимів (наприклад, величини подачі) та умов шліфування (охолодження, твердість круга). Отже, за належного добору режимів і умов завжди можливо сформувані такі параметри процесу, за яких обсяг і характер відхилень від ідеального перебігу залишатимуться в допустимих межах, тобто без виникнення дефектів.

Досить часто виникнення дефектів у процесі обробки пояснюють виключно порушенням технологічної дисципліни, використанням обладнання з низькими технічними характеристиками, збоями ритмічності роботи підприємства, недоліками організації праці тощо. Такий підхід є однобічним і спрощеним, оскільки зводить причини дефектів лише до грубих порушень перебігу технологічного процесу.

Насправді фізико-хімічні впливи, що супроводжують будь-який технологічний процес, неминуче породжують у матеріалі виробу відхилення від ідеальної структури та бажаних властивостей. Ці відхилення існують завжди; дефекти виникають тоді, коли вони виходять за межі, установлені нормативними вимогами. Тому технологічний процес, який є бездефектним за одних вимог до виробу, може виявитися дефектним за підвищених нормативів до вихідних параметрів.

У зв'язку з цим вивчення взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу та процесами зародження і формування дефектів становить один з ключових розділів технології виготовлення й ремонту. Для виробів рухомого складу це має особливе значення, оскільки саме на цій основі формуються обґрунтовані вимоги до режимів обробки, стабільності процесів і систем контролю, що забезпечують заданий рівень надійності.

Технологічна спадковість. Хоча вирішальну роль у формуванні показників якості готових виробів відіграють завершальні (фінішні) операції технологічного процесу, частина властивостей формується та передається з проміжних операцій. Це зумовлює необхідність розглядати всі етапи технологічного процесу, що беруть участь у формуванні

заданих властивостей виробу, і виявляти ті операції, які істотно впливають на вихідні параметри готової продукції. Явище перенесення властивостей об'єкта від попередніх операцій до наступних називають технологічним успадкуванням, а збереження цих властивостей у процесі подальшої обробки – технологічною спадковістю.

Носіями спадкової інформації є матеріал деталі та її геометричні форми. У ході технологічного процесу ці носії умовно «проходять» через різні технологічні бар'єри, на яких спадкові властивості можуть зберігатися частково або повністю. Так, для багатьох міцнісних характеристик суттєвим бар'єром є термічні операції, тоді як такі показники якості, як відхилення фактичної форми заготовки від ідеальної, зазвичай у тій чи іншій формі передаються від операції до операції. У низці випадків успадковуються й окремі конструктивні елементи виробу, що впливають на перебіг технологічного процесу, наприклад через змінну жорсткість деталі. За таких умов відбувається своєрідне «копіювання» форми заготовки з перенесенням цих відхилень, часто у зменшеному масштабі, на готовий виріб.

Дефекти, сформовані на окремих операціях, зокрема мікротріщини, можуть як розвиватися, так і частково усуватися на наступних етапах обробки. Наприклад, після точіння та гартування заготовки під час подальшого шліфування абразивний круг створює на ділянках мікровиступів шорсткої поверхні теплові удари, що спричиняють миттєвий нагрів і структурні зміни поверхневого шару металу. За чистових режимів шліфування в зонах під виступами нерівностей формуються ділянки відпущеного металу зі зниженою твердістю, тоді як за чорнових режимів – зони підвищеної твердості, що зазнали вторинного загартування. В обох випадках на межах різних структур виникають значні залишкові напруження, які знижують довговічність деталей і в окремих випадках спричиняють появу шліфувальних тріщин. Застосування шліфування з охолодженням істотно послаблює вплив таких теплових ударів.

Оскільки технологічна спадковість у більшості випадків негативно впливає на показники якості і є побічним наслідком обробки виробів, у технології прагнуть обмежити передачу похибок від операції до операції та зробити їх якомога більш незалежними в технологічному відношенні. Найбільш сприятливим є такий технологічний процес, за якого на початкових (чорнових) операціях відбувається практично повна ліквідація небажаних властивостей, і вони не успадковуються фінішними операціями. Це є важливою умовою забезпечення стабільної якості та надійності деталей і вузлів рухомого складу.

Наслідки технологічних дефектів у сфері експлуатації. У готовому виробі можуть залишатися технологічні дефекти, що належать до недопустимих, але або не виявлені через недосконалість методів контролю, або взагалі не регламентовані чинною нормативною документацією. Наявність таких дефектів здатна призводити до тяжких наслідків у процесі експлуатації машин, аж до виникнення аварійних ситуацій. Аналіз недопустимих виходів з ладу окремих вузлів і механізмів, їх поломок, значних деформацій та інших відмов функціонування показує, що причини цих явищ у більшості випадків пов'язані з неправильними методами експлуатації та проявом технологічних дефектів, закладених на стадії виготовлення. Узагальнений причинно-наслідковий ланцюг переходу від технологічного дефекту до експлуатаційних наслідків наведено на рис. 12.7.



Рис. 12.7. Узагальнююча схема впливу технологічних дефектів на наслідки в експлуатації виробів

Грубі порушення технологічного процесу й відповідно значні дефекти, як правило, проявляються вже під час обкатки або контрольних випробувань машини і можуть бути усунені у сфері виробництва. Саме тому випробування машин з погляду їх відповідності технологічним умовам та перевірка основних параметрів є завершальним етапом виготовлення. Водночас частина технологічних дефектів, не виявлених під час контролю окремих стадій технологічного процесу, може не проявлятися на початковому етапі роботи, але згодом стати причиною передчасної відмови виробу в експлуатації.

Для запобігання тяжким наслідкам відмов, пов'язаних із технологічними дефектами, необхідно, по-перше, нормативно регламентувати категорії дефектів і не допускати виникнення дефектів визначених видів і розмірів, а по-друге, забезпечити наявність ефективних засобів їх виявлення. Для більшості технологічних процесів у технічних умовах встановлюють вимоги щодо допустимості дефектів окремих категорій і задають гранично допустимі розміри, перевищення яких призводить

до порушення нормальної роботи виробу. Розвиток досконалих та економічно доцільних методів контролю є необхідною умовою виготовлення високонадійних виробів без ризику передчасних відмов, зумовлених технологією.

Для виявлення дефектів застосовують широкий спектр методів і засобів контролю, які доцільно поділяти на дві основні групи – руйнівні та неруйнівні. Руйнівні методи (випробування механічних властивостей, визначення твердості, металографічний аналіз, технологічні проби, зокрема випробування на осадку, тощо) мають вибірковий характер, призводять до пошкодження окремих деталей у партії й не дають змоги відокремити придатні деталі від бракованих у межах усієї партії. Вони є ефективними за умов високої однорідності властивостей та можливості періодичного відбору зразків для випробувань.

Неруйнівні методи контролю забезпечують суцільну перевірку відповідальних виробів і практично гарантують їх бездефектність. Ці методи об'єднують поняттям дефектоскопії, що ґрунтується на застосуванні різних фізичних принципів для виявлення й оцінювання внутрішніх і поверхневих дефектів. До неруйнівних методів контролю поверхневих дефектів належать і візуальні методи, однак їх можливості обмежені і вони не відповідають вимогам сучасного високотехнологічного виробництва.

Одним із важливих напрямів сучасної дефектоскопії є інтроскопія – контроль внутрішнього стану виробів і виявлення дефектів шляхом «просвічування» непрозорих тіл і середовищ. Слід зауважити, що в природі не існує абсолютно непрозорих (відносно всіх видів випромінювання) матеріалів; практично для будь-якого об'єкта можна підібрати відповідний метод просвічування, що узагальнено подано в табл. 12.1.

Звичайні засоби дефектоскопії, як правило, не забезпечують повної характеристики дефектів, оскільки здебільшого формують одноелементну інформацію, якої недостатньо для надійного визначення форми та розмірів дефекту, його орієнтації в об'ємі матеріалу та щільності заповнення. За таких умов можливості аналізу реального стану виробу істотно обмежені, особливо для відповідальних елементів рухомого складу.

Для отримання достовірних даних про реальні дефекти необхідна більш повна інформація про внутрішню будову речовини. Таку багатоелементну інформацію можна одержати шляхом використання різних спектрів проникного випромінювання. Фізичною основою інтроскопії є взаємодія проникних випромінювань з речовиною, в якій вони поширюються, що дає змогу реєструвати зміни параметрів випромінювання, зумовлені наявністю внутрішніх неоднорідностей.

Методи дефектоскопії та сфера їх застосування

Метод	Об'єкт контролю	Виявлені дефекти або контрольовані параметри
Рентгено- та гамма-просвічування	Лиття та стикові з'єднання, вимірювання товщини стінок	Поверхневі та глибинні тріщини, раковини, пухкі місця, ліквідаційні зони, включення
Капілярний	Поверхневі шари деталей	Тріщини (втоми, гартувальні, шліфувальні), пори, пухкі місця
Ультразвукові:		
Тіньовий	Стінки при двосторонньому доступі	Раковини, розшарування тощо.
Імпульсний ехометод	Поковки, прокат	Те саме, а також зони крупнозернистої структури
Резонансний	Стінки листів і труб	Розшарування
Звукові:		
Вільних коливань	Нероз'ємні з'єднання	Непропаяні та непоклеєні зони при з'єднанні
Імпедансний		
Магнітні:		
Магнітопорошковий	Поверхневі шари магнітних деталей	Поверхневі розриви (тріщини, волосини тощо). Магнітна структури-скопія
Ферозондний	Поверхневі шари деталей	Дефекти розривів. Вимірювання магнітних полів
Магнітографічний	Зварні з'єднання з магнітних металів	Тріщини та непровари глибиною до 10 % товщини стінки
Електромагнітні:		
Накладний катушки	Лакофарбові та гальванічні покриття, стінки листів і труб	Товщина покриттів і стінок, несучільності, тріщини, електропровідність поверхневих шарів
Прохідний катушки	Дріт, прутки, труби, контроль за марками	Витягнуті в довжину несучільності; твердість, поверхневий вміст вуглецю, розміри
Екранний	Листи, зварні з'єднання	Швидкісний контроль товщини, якості точкового зварювання; виявлення несучільностей

Як носії багатoeлементної інформації про внутрішню будову, склад і властивості непрозорих тіл і середовищ можуть застосовуватися різні види оптично сформованих або просторово розподілених потоків проникних випромінювань – від γ -квантів високих енергій до радіохвиль міліметрового та субміліметрового діапазонів, від пружних коливань високої частоти до корпускулярних випромінювань. Для тих самих цілей можливе використання нейтронних потоків та інших частинок із ще вищою проникною здатністю. Значні перспективи в неруйнівному контролі пов'язані також із голографічними методами, які дозволяють відтворювати просторову структуру об'єкта та виявляти приховані дефекти.

Застосування неруйнівних методів контролю як складової технологічних процесів підвищує їх надійність, сприяє своєчасному виявленню небезпечних дефектів і, як наслідок, забезпечує випуск продукції з заданим рівнем якості та надійності, що є особливо важливим для елементів і систем рухомого складу залізниць.

12.3. Експлуатаційні шляхи підвищення надійності рухомого складу

Дослідження надійності техніки в експлуатації тісно пов'язане з контролем і підтриманням технічного стану на рівні, достатньому для виконання заданих функцій. Метою таких досліджень є забезпечення ефективності функціонування системи за призначенням у встановлені строки, підтримання визначеної кількості виробів у стані готовності, гарантування безпеки виконання робіт, а також продовження строків експлуатації за умови збереження надійності на заданому рівні. У цьому контексті вдосконалення системи експлуатації постає як складна організаційно-технічна задача, що потребує самостійного наукового аналізу.

Одним із ключових питань експлуатації є оптимальне технічне обслуговування виробу, яке виконують відповідно до експлуатаційної документації з теоретичним і практичним обґрунтуванням видів, періодичності та обсягів обслуговувань. Паралельно постає завдання проведення дослідницьких робіт з оцінювання фактичного технічного стану виробу та призначення відповідних заходів обслуговування або ремонту за цим станом. Такий підхід відповідає стратегії експлуатації

системи за станом. Технічне обслуговування при цьому передбачає виконання профілактичних робіт або поточного ремонту.

Експлуатаційні властивості складної системи визначаються її безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю, збережуваністю та пристосованістю до технічного обслуговування в умовах експлуатації. Оптимізація експлуатації охоплює широкий спектр питань: вибір основних технічних і експлуатаційних характеристик, обґрунтування рівня контролепридатності та ремонтпридатності, визначення раціональної періодичності перевірок, технічного обслуговування і ремонту, а також обґрунтування складу та кількості запасних частин, інструментів і приладдя (ЗІП) із використанням різних видів резервування.

Розв'язання завдань контролю технічного стану і надійності всієї сукупності виробів, що перебувають в експлуатації, дає змогу оцінювати ефективність установленого в експлуатаційній документації порядку обслуговування, відновлення та ремонту техніки, своєчасно виявляти ненадійні елементи системи та приймати обґрунтовані рішення щодо підвищення її надійності. Контроль, діагностування та пошук несправностей дозволяють виявляти й усувати відмови на кожному конкретному виробі та практично реалізовувати експлуатацію за станом.

У задачах експлуатації та ремонту широко застосовують методи статистичного оцінювання показників надійності і методи перевірки статистичних гіпотез. Для підвищення ефективності обслуговування використовують моделі керованих процесів відновлення та оптимізації експлуатації елементів систем за ресурсом. Такі моделі враховують вплив обслуговування на надійність складних систем, їх відновлюваність, можливість забезпечення надійності за тривалої експлуатації шляхом попередньої заміни елементів, а також різні види резервування й моделі оцінювання кількості запасних елементів з урахуванням періодичності їх поповнення.

Організаційно-методичні питання ремонту включають визначення показників ремонтпридатності, вибір методів їх статистичного оцінювання, обґрунтування та планування ремонтів систем. Важливе місце в дослідженні надійності під час експлуатації посідає технічна діагностика, спрямована на попередження та виявлення несправностей. Завдання діагностування полягає у визначенні технічного стану системи, і для складних технічних об'єктів потреба в розв'язанні таких завдань зростає на всіх етапах життєвого циклу – від проєктування до експлуатації.

В умовах експлуатації істотний вплив мають зовнішні чинники середовища. Будь-яка система призначена для роботи в певних умовах,

на неї діють температура, вологість, тиск, опади, біологічні фактори, режими роботи тощо. Залежно від умов експлуатації змінюються кількісні значення показників надійності. Тому під час проектування важливим є прогнозування умов експлуатації з метою максимально можливого захисту системи від несприятливих впливів. Знання реальних умов експлуатації дає змогу коректно врахувати основні чинники під час розроблення програм випробувань системи або її вузлів. Водночас повне моделювання умов експлуатації не завжди можливе, тому при плануванні випробувань обирають найбільш значущі впливи, зважаючи на наявні стендові можливості.

У процесі експлуатації необхідно не лише забезпечувати надійність існуючих пристроїв, а й збирати та узагальнювати дані для створення нових технічних рішень. Для цього виконують комплекс заходів, які доцільно об'єднати у чотири групи (див. рис. 12.1). Наукові методи експлуатації включають обґрунтовані прийоми підготовки до роботи, профілактики, ремонту та інших заходів із забезпечення надійності, що мають бути чітко відображені в експлуатаційній документації.

В експлуатації рухомого складу важливу роль відіграє накопичений досвід, однак його безпосереднє перенесення на інші, навіть подібні об'єкти, не завжди є коректним. Тому необхідно формувати статистичні дані за окремими елементами, що є базою для створення більш надійних пристроїв. Збір і узагальнення інформації про відмови деталей становлять одну з ключових складових сучасного досвіду експлуатації.

Оброблення експлуатаційної інформації дозволяє виявляти так звані лімітуючі вузли, ресурс яких обмежує збільшення міжремонтних пробігів. Модернізація таких вузлів дає змогу підвищити міжремонтний ресурс і істотно збільшити коефіцієнт використання ресурсу іншого обладнання. Прикладом є програма масової модернізації рухомого складу під час виконання капітального ремонту КРП, коли рухомий склад оснащувався новими збірними одиницями, системами та бортовою діагностикою, що дозволило збільшити нормативні пробіги між плановими ремонтами та підвищити його надійність.

Ефективність експлуатаційних заходів значною мірою залежить від кваліфікації персоналу, хоча цей вплив є нерівномірним. Для простих операцій роль високої кваліфікації менша, тоді як у складних ситуаціях, що потребують суб'єктивних рішень, вона є визначальною. Зокрема, кваліфікація машиніста істотно впливає на тяжкість наслідків відмови локомотива у шляху прямування: незначний збій, який досвідчений машиніст усуне самостійно, за недостатньої підготовки може призвести до зупинки поїзда або пошкодження обладнання. Аналогіч-

но, для окремих ремонтних операцій доцільно залучати техніки, а для складних систем керування та радіоелектронного обладнання – фахівців із вищою або спеціальною освітою.

У цілому високу надійність рухомого складу можна забезпечити лише шляхом реалізації комплексу взаємопов'язаних заходів на всіх стадіях життєвого циклу – під час проектування, виготовлення та експлуатації.

Запитання до самоконтролю

1. У чому полягає основна мета дослідження надійності техніки в процесі експлуатації?

2. Які завдання вирішує контроль і підтримання технічного стану системи?

3. Що розуміють під ефективністю функціонування системи за призначенням?

4. Чому вдосконалення системи експлуатації розглядається як самотійна організаційно-технічна задача?

5. Які цілі експлуатації технічних систем пов'язані з безпекою виконання робіт?

6. Яке значення має підтримання виробів у стані готовності?

7. Чому продовження строків експлуатації повинно супроводжуватися забезпеченням заданого рівня надійності?

8. Які основні експлуатаційні властивості визначають працездатність складної технічної системи?

9. Яке місце безвідмовності в сукупності експлуатаційних властивостей системи?

10. Чому надійність необхідно розглядати саме в умовах реальної експлуатації?

11. Що таке технічне обслуговування виробу і на чому воно ґрунтується?

12. Яку роль відіграє експлуатаційна документація в системі ТО?

13. У чому полягає сутність стратегії експлуатації системи за станом?

14. Чим експлуатація за станом відрізняється від експлуатації за напруженням?

15. Які види робіт охоплює технічне обслуговування виробу?

16. У яких випадках призначають профілактичне обслуговування?

17. Коли доцільно виконувати поточний ремонт?

18. Які переваги дає призначення ТО і ремонту за фактичним технічним станом?

19. Які вимоги висуваються до засобів контролю при експлуатації за станом?
20. Чому експлуатація за станом особливо актуальна для рухомого складу залізниць?
21. Яку роль відіграє контроль технічного стану в експлуатації техніки?
22. У чому полягає завдання технічної діагностики?
23. Чим відрізняються поняття «контроль», «діагностування» і «пошук несправностей»?
24. Які рішення дозволяє приймати контроль надійності сукупності виробів в експлуатації?
25. Яким чином результати контролю впливають на коригування системи ТО і ремонту?
26. Які статистичні методи використовують для оцінювання показників надійності?
27. Для чого в експлуатації застосовують перевірку статистичних гіпотез?
28. Що таке керовані процеси відновлення і яку роль вони відіграють в експлуатації?
29. Чому при моделюванні експлуатації враховують відновлюваність систем?
30. Яким чином моделі резервування впливають на надійність системи в експлуатації?
31. Які зовнішні фактори впливають на надійність технічних систем в експлуатації?
32. Як умови навколишнього середовища впливають на показники надійності?
33. Чому кількісні значення показників надійності змінюються залежно від умов експлуатації?
34. Яке значення має прогнозування умов експлуатації на стадії проєктування?
35. Чому повне моделювання умов експлуатації не завжди можливе?
36. За якими принципами обирають найбільш впливові фактори при програмі випробувань?
37. Як умови експлуатації враховуються під час стендових випробувань?
38. Чому знання реальних умов експлуатації важливе як для розробника, так і для експлуатаційника?

39. Яку роль відіграє досвід експлуатації в підвищенні надійності ЕРС?
40. Чому безпосереднє перенесення досвіду експлуатації на інші об'єкти не завжди є коректним?
41. Яке значення має збір статистичних даних про відмови елементів?
42. Що таке лімітуючі вузли і як їх виявляють?
43. Як модернізація лімітуючих вузлів впливає на міжремонтний ресурс?
44. Яку роль відіграють системи бортової діагностики в експлуатації локомотивів?
45. Чому ефективність експлуатаційних заходів залежить від кваліфікації персоналу?
46. У яких випадках кваліфікація машиніста є критично важливою для безпеки руху?
47. Чому для обслуговування сучасних систем керування потрібні фахівці з вищою освітою?
48. Яким чином організаційні форми взаємозв'язку між виробником і експлуатаційником впливають на надійність?
49. Чому підвищення надійності неможливе лише за рахунок експлуатації без урахування проектування і виготовлення?
50. Чому забезпечення високої надійності ЕРС потребує комплексного підходу на всіх стадіях життєвого циклу?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи надійності вагонів : навч. посіб. / М. Б. Кельріх та ін. ; за заг. ред. І. Е. Мартинова. Харків : УкрДАЗТ, 2013. 106 с.
2. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996-01-01. Київ : Держстандарт України, 1996. 62 с.
3. Gnedenko B. V., Bélyaev Yu. K., Solovyev A. D. Mathematical Methods in Reliability Theory. New York : Academic Press, 1969. 506 p.
4. ДСТУ 9050:2020. Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять. Чинний від 2021-04-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 28 с.
5. Мельниченко О. П., Якименко І. Л., Шевченко Р. Л. Статистична обробка експериментальних даних : навч. посіб. Біла Церква : БДАУ, 2006. 36 с.
6. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Чинний від 1996-01-01. Київ : Держстандарт України, 1995. 27 с.
7. ДСТУ 8647:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов. Чинний від 2017-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 28 с.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- λ -характеристика, 165
- DN-розподіл, 350
- DM-розподіл, 354
- Автомодельність процесу, 358
- Адсорбція, 83
- Альфа-розподіл, 345
- Апостеріорний аналіз надійності, 35
- Апріорна імовірність події, 46
- Апріорний аналіз надійності, 34
- Асиметрія розподілу, 66
- Атестаційні випробування, 437
- Багатофакторні випробування, 434
- Безвідмовність, 24, 133
- Безперервна величина, 45
- Безпечна відмова, 127
- Важка відмова, 123
- Варіаційний ряд, 71
- Взаємодія: механічна, 81
 - теплова, 81
- Вибіркова: медіана, 510
 - мода, 510
 - сукупність, 70
- Визначальний параметр, 36
- Визначальні: випробування, 434
 - параметри, 342
- Випадкова: величина, 45
 - відмова, 122
- Виробнича (виготовлювальна)
 - відмова, 121
- Відмова, 115, 117
- Відмова: IV виду, 124
 - другого роду, 124
 - другої категорії, 127
 - I виду, 124
 - із загальної причини, 126
 - II виду, 124
 - III вид, 124
 - першого роду, 123
 - першої категорії, 126
 - третьої категорії, 127
- Відмови: параметричні, 118
 - функціонування, 118
- Відносна тривалість випробувань, 466
- Відсутність післядії потоку відмов, 176
- Втома, 299
- Гамма-відсоткова тривалість відновлення, 226
- Гамма-відсотковий: наробіток до відмови, 151
 - ресурс, 241
 - термін збережуваності, 237
 - термін служби, 241
- Гамма-розподіл, 330
- Гарантійний термін служби, 242
- Генеральна сукупність, 70
- Гістограма, 71, 511
- Гістограма відносних частот, 71
- Готовність, 133
- Гранична відносна похибка, 460
- Граничний стан, 114
- Граф незв'язний, 401
- Граф переходів локомотива, 274
- Густина розподілу, 60
- Деградаційні процеси, 347
- Дедукція, 43
- Декомпозиція, 111
- Детермінована величина, 45

Дефект, 115, 117
 Дискретна величина, 45
 Дисперсія, 66, 68
 Диференціальна форма закону розподілу, 60
 Дифільна молекула, 93
 Дифузійний монотонний розподіл, 354
 Дифузійний немонотонний розподіл, 350
 Дифузійний розподіл, 343
 Дифузія, 83
 Діаграма Ісікави, 129
 реалізацій, 447, 507
 станів та переходів, 401
 Діаграми Парето, 131
 Добутком подій, 48
 Довговічність, 24, 133, 238
 Довірча імовірність, 426
 Довірчий інтервал, 74
 Доводочні випробування, 435
 Дослідні випробування, 434
 Дублювання, 396
 Експлуатаційна відмова, 121
 Експлуатаційні випробування, 439
 Експоненційний (показниковий) закон розподілу, 304
 Ексцес, 66
 Елемент, 111, 378
 Емпірична функція розподілу, 512
 Ентальпія, 82
 Ентропія, 82
 Ефект Ребіндера, 93
 Загальне резервування, 392
 Закон розподілу, 56
 випадкової величини, 62
 Залежна відмова, 126
 Залишкові деформації, 300
 Збереженість, 24
 Збережуваність, 133, 236
 Зминання, 300
 Зносова модель, 341
 Імовірнісні моделі відмов, 290
 Імовірнісно-фізична модель, 343
 Імовірнісно-фізичні моделі, 342
 Імовірнісно-фізичні моделі відмов, 290
 Імовірність безвідмовної роботи, 142
 Імовірність відмови, 146
 Імовірність відновлення, 220
 Інверсія гістограми, 508
 Індукція, 43
 Інспекційні випробування, 437
 Інтегральна теорема Лапласа, 55
 Інтенсивність відмов, 159
 Інтенсивність відновлення, 225
 Інтервальна оцінка показника надійності, 426
 Капітальний ремонт з продовженням терміну служби, 204
 Капітальний ремонт КР-1, 203
 Капітальний ремонт КР-2, 204
 Категорії наслідків відмов, 17
 Кваліфікаційні випробування, 436
 Квантиль, 66
 Кількісний показник надійності, 134
 Кінетика процесу, 290
 Коефіцієнт варіації, 66
 Коефіцієнт витрат на технічне обслуговування і ремонт, 251
 Коефіцієнт готовності, 247
 Коефіцієнт збереження ефективності, 251
 Коефіцієнт неготовності, 251
 Коефіцієнт оперативної готовності, 249
 Коефіцієнт простою, 251
 Коефіцієнт технічного використання, 249
 Комплексний показник, 135
 Конструкційна відмова, 121
 Контрольна діаграма, 542
 Контрольні (підконтрольні) випробування, 434
 Корозія, 300
 Кратність резерву, 392
 Крива убутку, 149
 Критерії відмови, 116
 Критерій згоди, 364
 Критерій припинення випробувань, 444

Лабораторні випробування, 438
 Легка відмова, 123
 Логарифмічно-нормальний розподіл, 322
 Марківські процеси, 347
 Марковський процес, 252
 Мартенситне перетворення, 101
 Математичне сподівання, 67
 Метод квантилів, 489
 Метод максимальної правдоподібності, 491
 Метод моментів, 486
 Метод структурних схем, 380, 385
 Мода, 66
 Модель «міцність-навантаження», 339
 Модель «параметр-допуск», 341
 Модель відмов, 290
 Модель миттєвих відмов із порогом чутливості, 296
 Модель миттєвої відмови, 294
 Навантажений резерв, 394
 Надійність, 23
 Найпростіший потік відмов, 175
 Натурні випробування, 440
 Небезпечна відмова, 127
 Небезпечний стан, 127
 Негативний показник надійності, 136
 Незалежна відмова, 126
 Незалежні події, 52
 Немонотонний характер процесу, 293
 Ненавантажене резервування, 400
 Ненавантажений резерв, 394
 Непараметричний підхід, 36
 Неплановий ремонт, 205
 Неповні реалізації, 484
 Непрацездатний стан, 24, 114
 Неявна (прихована, латентна) відмова, 125
 Номінальна інтенсивність відмов, 385
 Нормальний розподіл, 307
 Нормальні випробування, 440

Об'єднана питома сумарна тривалість технічних обслуговувань і ремонтів, 228
 Об'єднана питома сумарна трудомісткість технічних обслуговувань і ремонтів, 228
 Об'єкт, 111
 Обсяг випробувань, 459
 Обсяг випробувань на надійність, 443
 Обсяг ТО та ремонту, 204
 Одиничний показник, 135
 Однофакторні випробування, 434
 Ординарність потоку відмов, 175
 Орієнтовний розрахунок показників надійності, 383
 Основне рівняння надійності, 189
 Основне рівняння надійності для невідновлюваних виробів, 165
 Основний елемент, 391
 Остаточний (повний) розрахунок показників надійності, 384
 Оцінка асимптотично незміщена, 72
 Оцінка достатня, 72
 Оцінка ефективна, 72
 Оцінка конзистентна, 72
 Оцінка незміщена, 71
 Оцінка слухна, 72
 Оцінка точкова, 71
 Параметр масштабу, 326
 потоку відмов, 172
 форми, 326
 Параметричний підхід, 35
 Перетворення Лапласа, 263
 Період нормальної експлуатації, 168
 припрацювання, 168
 старіння, 169
 Періодичні випробування, 437
 Періодичність ТО та ремонту, 204
 Питома сумарна вартість технічних обслуговувань (або ремонтів), 228
 Питома сумарна тривалість технічних обслуговувань (або ремонтів), 228

Питома сумарна трудомісткість
 технічного обслуговування (або
 ремонтів), 228
 План [NRr], 451
 [NUr], 451
 [NUT], 451
 [NMT], 452
 {NUT}, 452
 План випробувань, 443
 Плани випробувань, 444
 Повна відмова, 125
 Повний план, 447
 Повні реалізації, 484
 Позитивний показник надійності,
 136
 Показники безпеки, 21
 екологічні, 21
 економічні, 20
 ергономічні, 21
 естетичні, 21
 патентно-правові, 21
 призначення, 19
 стандартизації та
 уніфікації, 21
 технологічності, 21
 типу “імовірність”, 482
 типу “наробіток”, 482
 транспортельності, 21
 Полегшений резерв, 394
 Полігон розподілу, 512
 Полігонні випробування, 439
 Попередні випробування, 436
 Попередній розрахунок показників
 надійності, 383
 Порівняльні випробування, 435
 Постійне резервування, 394
 Поступова відмова, 120
 Потік відмов, 175
 Поточний ремонт, 203
 Початковий момент першого
 порядку, 67
 Пошкодження, 115, 117
 Правило «трьох сігм», 310
 Старджеса, 508
 Працездатний стан, 24, 114
 Пред’явні випробування, 436

Приймальні випробування, 436
 Приймально-
 здавальні випробування, 437
 Припрацьовочні відмови, 64
 Прискорені випробування, 440
 Прихована відмова, 116
 Проста система, 379
 Процес із монотонними
 реалізаціями, 343
 Раптова відмова, 119
 Резервний елемент, 391
 Резервований елемент, 392
 Резервування, 391
 Резервування з дробовою кратністю,
 393
 Резервування з цілою кратністю, 393
 Резервування заміщенням, 394
 Ремонт, 202
 Ремонтна відмова, 122
 Ремонтні градації деталей, 31
 Ремонтомісткість, 251
 Ремонтопридатність, 24, 133, 201
 Ремонтування, 202
 Репрезентативна вибірка, 70
 Ресурс, 239
 Рівень значущості, 427
 Рівні досліджень надійності, 36
 Рівномірний розподіл, 63
 Рівняння Колмогорова, 263
 Роздільне резервування, 392
 Розподіл Вейбулла, 325
 Розподіл Гауса, 307
 Розподіл Релея, 334
 Ряд Тейлора, 261
 Самоусувна відмова, 123
 Середнє значення параметра потоку
 відмов, 172
 Середній коефіцієнт готовності, 251
 наробіток до відмови, 154
 наробіток на відмову, 170
 ресурс, 240
 термін збережуваності,
 237
 термін служби, 241

Середня вартість технічного
 обслуговування (ремонту), 228
 відмова, 123
 інтенсивність відновлення, 226
 сумарна вартість технічних
 обслуговувань (або ремонтів), 228
 сумарна тривалість технічних
 обслуговувань (або ремонтів), 228
 сумарна трудомісткість
 технічного обслуговування (або
 ремонтів), 228
 тривалість відновлення, 223
 трудомісткість технічного
 обслуговування (ремонту), 226
 Сертифікаційні випробування, 437
 Система, 378
 Система технічного обслуговування
 і ремонту, 216
 Систематична відмова, 122
 Складна система, 379
 Скорочені випробування, 440
 Справний стан, 23, 113
 Стадія розвитку техніки друга, 12
 перша, 12
 Статистична оцінка імовірності
 безвідмовної роботи об'єкта, 144
 Статистична оцінка імовірності
 відмови об'єкта, 147
 Статистична оцінка середнього
 наробітку до відмови, 157
 Стаціонарний коефіцієнт готовності,
 251
 Стаціонарність потоку відмов, 175
 Стендові випробування, 438
 Стійка відмова, 123
 Стохастичне диференціальне
 рівняння, 348
 Стохастичний процес, 343
 Структурна схема надійності, 380
 Структурний розрахунок надійності,
 37

Сума подій, 48
 Схема «відмова-відновлення», 265
 Табулювання функції, 313
 Теорема додавання імовірностей, 48
 множення імовірностей, 50
 Термін служби, 240
 Технічне обслуговування, 202
 Типові випробування, 437
 Точкова оцінка показника
 надійності, 426
 Трикутник співвідношень
 показників надійності, 191
 Умовна імовірність безвідмовної
 роботи, 145
 Умовні реалізації, 484
 Усічена вибірка, 451
 Усічений нормальний розподіл, 320
Форми обліку надійності
 локомотивів, 470
Форми технічного обслуговування
 та ремонту, 216
Формула Бернуллі, 54
 повної імовірності, 53
 Пуассона, 54
Функціональний розрахунок
 надійності, 37
Функція Лапласа, 55
 надійності, 143
 правдоподібності, 491
 розподілу, 59
Цензурування, 443
Центр розподілу, 67
Центральний момент другого
 порядку, 67
Центрований розподіл, 313
Часткова відмова, 125
Частота відмов, 149
Явна (очевидна) відмова, 125

Навчальне видання

*Бобирь Дмитро Валерійович, Капіца Михайло Іванович,
Очкасов Олександр Борисович, Рибалка Роман Володимирович*

НАДІЙНІСТЬ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА

Підручник у двох томах

Том 1

Надійність рухомого складу

Електронне видання

Відповідальний редактор М. І. Капіца
Комп'ютерна верстка Д. В. Бобирь
Дизайн обкладинки Д. В. Бобирь

Експертний висновок склав канд. техн. наук Дмитро Кислий

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.860 від 12.02.2026)

Формат 60x84 ^{1/16}. Ум. друк. арк. 35. Обл.-вид. арк. 36,6.
Зам. № 24

Видавець: Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 263 (наукова бібліотека).
м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022