



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ**  
**ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**  
**ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ**  
**УНІВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТУ**

## **ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ**

**Навчальний посібник**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів  
вищих навчальних закладів*

**Харків 2013**

УДК 629.423.125  
ББК 39.24  
О 734

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (№ 1/11-9774 від 10.06.13 р.).*

**Рецензенти:**

професор, д.т.н. В.М. Бубнов (НВО "Азовмаш"),  
професор, д.т.н. В.Г. Маслієв (НТУ "ХП")  
професор, д.т.н. А.П. Фалендиш (УкрДАЗТ)

**Авторський колектив:**

І.Е. Мартинов – вступ, розділи 1 2, 6, 7; М.Б. Кельріх – розділи 4, 5;  
Н.С. Брайковська – розділ 3, 8; В.М. Петухов – розділ 9.

Під загальною редакцією проф. І.Е. Мартинова

О 734 Основи надійності вагонів: Навч. посібник /  
М.Б. Кельріх, І.Е. Мартинов, Н.С. Брайковська та ін. –  
Харків: УкрДАЗТ, 2013. – 106 с.с., табл. 21, рис. 59.  
ISBN 978-617-654-012-0

У навчальному посібнику розглянуто основні поняття, терміни та визначення теорії надійності, що стосуються забезпечення надійності рухомого складу. Розглянуто специфіку задач забезпечення надійності вагонів з урахуванням знесобленого характеру експлуатації. Викладені основні теоретичні положення кількісної оцінки показників надійності вагонів, їх вузлів і деталей. Розглянуто основні положення проведення випробувань вагонів на надійність.

Посібник призначений для студентів, що навчаються за спеціальністю 7.07010502 "Вагони та вагонне господарство". Викладений матеріал охоплює основні задачі для фахівців, які можуть зустрітися в практичній роботі. Посібник призначений для студентів усіх форм навчання при виконанні дипломних проектів, контрольних робіт, підготовки до практичних занять.

УДК 629.423.125  
ББК 39.24

**ISBN 978-617-654-012-0**

© Українська державна академія  
залізничного транспорту, 2013.

Навчальний посібник

**Кельріх Михайло Борисович,**  
**Мартинов Ігор Ернстович,**  
**Брайковська Надія Сергіївна**  
та ін.

## ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ

Відповідальний за випуск Петухов В.М.

Редактор Еткало О.О.

---

Підписано до друку 18.12.2013 р.

Формат паперу 60x84 1/8. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 3,5. Тираж 300. Замовлення № 221.

Видавець Українська державна академія залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейсрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Виготовлювач ТОВ «Енергозберігаючі технології»

61050, Харків, Харківська набережна, 8.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1360 від 19.05.2003 р.

## ЗМІСТ

1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ.....	
1.1. Надійність як складова якості технічних об'єктів....	
1.2. Надійність і технічний прогрес.....	
1.3. Техніко-економічні наслідки низької надійності техніки.....	
1.4. Основні етапи розвитку робіт у галузі надійності.....	
1.5. Завдання, що вирішуються теорією надійності.....	
2. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ.....	
2.1. Поняття про технічні об'єкти.....	
2.2. Причини втрати працездатності машини.....	
2.3. Класифікація причин відмов.....	
2.4. Комплексний характер надійності.....	
3. СТИСЛІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ ЙМОВІРНОСТЕЙ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ.....	
3.1. Випадкові події та їх характеристики.....	
3.2. Основні теореми теорії ймовірностей.....	
4. ВИПАДКОВІ ВЕЛИЧИНИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.	
4.1. Закони розподілу дискретних випадкових величин.....	
4.2. Розподіл безперервних випадкових величин.....	
4.3. Числові характеристики розподілів випадкових величин.....	
5. КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ.....	
5.1. Показники надійності виробів, що не відновлюються.....	
5.2. Характеристики надійності виробів, що відновлюються.....	
5.3. Комплексні показники надійності.....	
6. МОДЕЛІ ВІДМОВ.....	
6.1. Модель раптових відмов.....	
6.2. Модель поступових відмов.....	
6.3. Сумісна дія раптових і поступових відмов.....	
6.4. Гамма-розподіл.....	
7. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ...	

7.1. Основні вимоги до інформації про надійність вагонів.....	
7.2. Експериментальна перевірка надійності вагонів.....	
7.3. Плани спостережень.....	
7.4. Статистичні методи обробки експериментальних даних.....	
7.5. Основні методи визначення параметрів функції розподілу.....	
8. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ.....	
8.1. Методи забезпечення надійності на етапі проектування.....	
8.2. Методи підвищення надійності на етапі виробництва.....	
8.3. Забезпечення надійності в процесі експлуатації.....	
9. НАДІЙНІСТЬ СКЛАДНИХ СИСТЕМ.....	
9.1. Загальні відомості про складні системи.....	
9.2. Класифікація методів резервування.....	
Бібліографічний список.....	
Предметний покажчик.....	

# 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ

## 1.1. Надійність як складова якості технічних об'єктів

Особливістю експлуатації виробів серійного виробництва, до яких належать вагони, локомотиви, автомобілі та інші транспортні засоби, є значне розсіювання часу напрацювання до першого пошкодження або між пошкодженнями після ремонту.

Абсолютно однакові за конструкцією та умовами експлуатації вироби мають суттєво різний час роботи до відмови. Причиною цього є неоднорідність властивостей міцності матеріалу, з якого виготовлені ті або інші вироби, та випадковість процесів навантаження. Тобто точно прогнозувати момент відмови того або іншого виробу, на жаль, неможливо.

У різних галузях промисловості й транспорту при проектуванні виконують в основному детерміновані розрахунки на міцність за напруженнями, що допускаються (тобто без урахування фактора випадковості), з використанням такої умови:

$$\sigma_p \leq [\sigma], \quad (1.1)$$

де  $\sigma_p$  - розрахункові напруження,  $[\sigma]$  - напруження, що допускаються.

Отримати достовірні результати при виконанні детермінованих розрахунків практично не можливо, тому що як навантаження, так і міцність є випадковими параметрами, які перебувають під впливом багатьох випадкових факторів. При середніх значеннях усіх параметрів транспортних машин останні мають певний запас міцності. При несприятливих значеннях навантажень у небезпечних точках, наприклад у зоні технологічних отворів надресорної балки вантажного візка, напруження перевищують межу міцності матеріалу. Це викликає появу тріщин або повне руйнування деталей. Але збіг цих несприятливих навантажень трапляється дуже рідко та його неможливо передбачити заздалегідь. Ця особливість не враховується при проведенні звичайних розрахунків з напружень, що допускаються.

Крім того, задачі забезпечення надійності інколи набувають антропологічного характеру, коли відмова об'єкта може статися через втрату пильності оператора (тобто через "людський фактор").

Що являє собою надійність? На емпіричному рівні ми розуміємо, що кожному виробу притаманні особливі властивості, технічні характеристики, які обумовлені замовником на етапі розроблення технічних вимог і технічного завдання. Вони враховуються конструкторами вже при проектуванні. Кожній речі, виробу, виду продукції властиві свої особливі показники якості, які характерні лише для них. Коли ми купуємо продукти харчування, для нас важливо, щоб вони були свіжими, поживними, смачними. Купуючи тканину, ми цікавимося не лише її зовнішнім виглядом, але і її щільністю, міцністю на розтяг та на розрив, дізнаємося, чи дуже вона мнеться, линяє, чи збігається після прання. Якість виробів промислового призначення оцінюється за технічними показниками, параметрами, характеристиками. Наприклад, для оцінки якості вагона враховуються функціональні показники: вантажопідйомність, габаритні розміри, конструктивна швидкість, питомий об'єм (або питома площа), навантаження на вісь, погонне навантаження та ін.

Але чи можна лише на підставі вихідних даних нового вагона зробити остаточний висновок про його якість? Властивості нового вагона проявляються лише у процесі роботи. Зрозуміло, що будь-який досвідчений виробничник перед прийняттям рішення про початок масового виробництва перспективної конструкції вагона скаже: "Давайте все ж попередньо перевіримо вагон у роботі". З такою пропозицією важко не погодитися. Справа в тому, що всі паспортні показники і параметри відображають лише вихідні технічні можливості вагона, але ці можливості перетворюються в дійсність тільки тоді, коли вагон бере участь у процесі перевезень, тобто коли він працює. Вихідні характеристики виробу ще не можуть охарактеризувати цілком його якість. Необхідно знати також спроможність цього виробу зберігати вихідні характеристики під час експлуатації.

Машина, яка не бере участі в процесі праці, природно,

марна. Тому при оцінці якості будь-якої машини для нас важливі не тільки її високі номінальні технічні дані, але і її фактична здатність безвідмовно працювати протягом більш тривалого часу, зберігаючи свої первісні технічні характеристики.

Проте жодна машина, як би відмінно вона не була зроблена, не працює нескінченно довго без єдиної несправності, без поступового погіршення своїх первісних технічних показників. Будь-який елемент конструкції машини може пропрацювати безвідмовно лише певний обмежений час, що залежить від ресурсу, який вкладений у неї в конкретних умовах експлуатації. Тому потрібне відновлення втраченої працездатності шляхом ремонту або заміни елементів.

Таким чином, кожний технічний пристрій характеризується тією чи іншою мірою здатністю, властивістю зберігати протягом експлуатації свої початкові характеристики і здатністю виконувати задані функції в справному і працездатному стані. Ця властивість визначається його надійністю. Отже, фізичний зміст надійності виробу полягає у властивості зберігати свої експлуатаційні характеристики в часі. Очевидно, чим довше зберігає виріб свою справність, працездатність, чим рідше відмовляє, тим він є надійнішим і, природно, є більш якісним. Іншими словами, надійність, як властивість виробу, машини, верстата, вагона є однією зі складових якості поряд з їх функціональними, технологічними, економічними й ергономічними показниками. Отже, висока якість виробу містить у собі не тільки високі показники таких його властивостей, як продуктивність, швидкість, потужність, точність та ін., але і його високу надійність. Ці складові якості органічно взаємозалежні, мають значення тільки у взаємодії один з одним.

Сама по собі надійність ще не визначає високої якості верстата або вагона. Вони можуть бути виключно надійними, але мати дуже недосконалі технічні характеристики: малу вантажопідйомність, високу вагу тари, низьку конструктивну швидкість. Але відмінні вихідні 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 істотно відрізняється від усіх інших

його властивостей, оскільки вона є найбільш загальною комплексною властивістю, що характеризує корисність будь-якого технічного виробу, машини, приладу; надійність – це єдина спільна властивість більшості промислових виробів; надійність реалізується лише в часі, всі інші властивості мають миттєві значення; надійність не підлягає інструментальному вимірюванню, а визначається розрахунками (імовірнісними або статистичними) і випробуваннями дослідних зразків.

Комплексність властивості "надійність" виражається в тому, що технічний пристрій тим надійніший, чим рідше він відмовляє, чим довше зберігає працездатність, чим простіше і дешевше відновлюється після відмови.

У нормативно-технічній документації надійність визначається як властивість об'єкта зберігати повсякчасно в установлених межах значення всіх параметрів, що характеризують спроможність виконувати необхідні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування. У цьому визначенні мається на увазі, що вироби виготовлені при дотриманні відповідних норм конструювання й технології.

Таким чином, надійність є однією зі складових частин якості будь-якого промислового виробу. Наука про надійність вивчає закономірності зміни показників якості технічних приладів і систем та на підставі цього розробляє методи, що забезпечують з мінімальною витратою часу і коштів необхідну довговічність і безвідмовність їхньої роботи.

Теорія надійності у своїй діяльності спирається на математику, теорію коливань, теорію пружності, механіку руйнування, технологію матеріалів тощо.

## **1.2. Надійність і технічний прогрес**

Першорядне значення надійності пов'язане з тим, що рівень надійності значною мірою визначає розвиток техніки за основними напрямками: автоматизацію виробництва, інтенсифікацію робочих процесів, економію матеріалів і енергії.



Сучасні технічні засоби складаються з безлічі взаємодіючих механізмів, апаратів та приладів. Наприклад, сучасні системи управління ракетами мають десятки тисяч елементів, тоді як перші найпростіші радіоприймачі склалися лише з десятків деталей. Відмова у роботі хоча б одного відповідального елемента складної системи без резервування може призвести до порушення роботи всієї системи.

По мірі ускладнення техніки, поширення галузей її використання, підвищення рівня автоматизації, збільшення навантажень і швидкостей роль питань надійності буде безупинно зростати. І справа не лише в тому, що в цих умовах підвищуються вимоги до безвідмовності та довговічності виробів, але й у тому, що вирішення питань надійності стає одним з основних джерел підвищення ефективності техніки, економії матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів, підвищення конкурентоспроможності техніки.

Недостатньо високий рівень надійності техніки призводить до аварій і катастроф. Наприклад, у США в 1965 році сталася виключна за масштабами аварія, що залишила без електроенергії величезну частину території країни з населенням 40 млн без електроенергії, освітлення та електротранспорту на 14 год. Причина аварії - відмова одного реле на розподільному щиті Ніагарської гідроелектростанції.

Але особлива вага приділяється надійності транспортних засобів усіх типів, оскільки це пов'язано з безпекою руху. Відмова елементів гальмівної системи автомобіля призводить до виникнення дорожньо-транспортної пригоди. Відмова елементів вагонів може спричинити затримку поїзда під час руху, створити аварійну ситуацію і призвести до загибелі людей.

### **1.3. Техніко-економічні наслідки низької надійності техніки**

Недостатня надійність машин і механізмів призводить до збільшення матеріальних і трудових витрат на відновлення та ремонт техніки, зростання потреби у запасних частинах через їх передчасне спрацювання, збільшення собівартості продукції за рахунок витрат на відновлення після відмов. Недостатньо

високий рівень надійності є однією з основних причин невиправдано великих витрат матеріальних ресурсів на технічне обслуговування та ремонт техніки, на виробництво запасних частин.

Наслідки відмов машин, технічних систем і об'єктів можна розділити на дві категорії:

- прямі втрати через відмови, аварії, катастрофи (простій машин або обладнання, які відмовили, 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, які відмовили, їх ремонт та відновлення працездатності.

На машинобудівних заводах СРСР витрати на ремонт та утримання обладнання становили 12-18 % від загальної величини цехових витрат. Щорічно 11-12 % технологічного устаткування підлягало капітальному ремонту, 20-25 % - середньому і 90-100 % - поточному. Щорічні витрати на ремонт техніки у вугільній, гірничорудній, лісозаготівельній промисловості і сільському господарстві досягали 15-20 % її вартості. Тільки на ремонт металообробних верстатів щорічно витрачалося 240 тис. т чавуну, сталі і кольорових металів. З цих матеріалів можна було б додатково виготовити 150 тис. токарних верстатів середньої потужності. На ремонт тракторів щорічно витрачалася така кількість металу, що з нього можна було б зібрати 180 тис. нових тракторів.

Витрати на ремонт і технічне обслуговування за термін служби машини в кілька разів перевищують її вартість: для автомобілів – в 6 разів, для літаків – до 5 разів, для верстатів – до 8 разів. На частку тракторобудівних заводів припадає лише 22 % потужностей, а на частку заводів з випуску запчастин до тракторів – 34 %, на частку ремонтних підприємств – 44 %. Інакше кажучи, на ремонт тракторів витрачалося в 4 рази більше виробничих потужностей, ніж на їх виготовлення. Саме низька якість тракторів та іншої сільськогосподарської техніки призвела до того, що тракторобудування в незалежній Україні практично зникло як галузь машинобудування.

Трудомісткість ремонту й технічного обслуговування багатьох будівельних і дорожніх машин за термін їх служби

приблизно в 15 разів перевищує трудомісткість виготовлення нових. Ремонт техніки в СРСР здійснювали 7 млн. робітників, одна третина верстатного парку перебувала на ремонтних підприємствах, на запчастини витрачалося більше однієї п'ятої виплавленого металу.

Сказане вище повною мірою стосується і залізничної техніки, зокрема рухомого складу. Витрати на ремонт локомотивів, моторвагонного рухомого складу і вагонів у 1975 році становили близько 20 % експлуатаційних витрат залізниць країни. Ремонт і технічне обслуговування рухомого складу виконували 860 тис. працівників. Щорічні витрати на ремонт становили близько 4 млрд руб. Тільки в депо ремонт локомотивів і вагонів здійснювали 527 тис. люд, витрати перевищували 1 млрд руб. Близько 30 % працівників вагонного господарства ремонтували вагони. Ремонт кожного вагона за весь термін служби обходився в 10 разів дорожче від його первісної вартості.

Недостатня надійність технічних засобів залізниць призводить до затримок поїздів, зниження пропускної і провізної здатності залізниць. Так, до середини 80-х років при швидкому зростанні вантажонапруженості різко підвищилися як абсолютні, так і відносні затримки поїздів, у тому числі через незадовільний технічний стан рухомого складу. Це призвело до погіршення показників роботи залізничного транспорту, ускладнило нормальну роботу промисловості, сільського господарства і народного господарства в цілому, завдавши йому великого збитку.

#### **1.4. Основні етапи розвитку робіт у галузі надійності**

Наука про надійність технічних пристроїв – одна з наймолодших прикладних інженерних наук, які бурхливо розвиваються. Але проблема надійності, що є предметом цієї науки, одна з найдавніших. Хоча питаннями забезпечення надійності людина цікавилася з моменту створення першого знаряддя праці (мисливець, виходячи на полювання, повинен був бути впевнений у якості своєї рушниці або іншого знаряддя мисливства), теорія надійності як самостійна наука сформувалася

лише в середині ХХ століття. До цього часу надійність техніки забезпечувалася в основному використанням накопиченого практичного досвіду, емпірично. До настання епохи машинного виробництва інструменти, найпростіші машини були не серійними, як зараз, а одиничними, виготовленими конкретним майстром, що мав свій досвід, свої "секрети" виготовлення якісних виробів.

Це, однак, не означає, що вимоги до надійності технічних пристроїв і споруд не були визначені. Історичні свідчення говорять про те, що ще в давнину надійності споруд, зброї приділялася належна увага. Майже 4000 років тому у Вавилоні існував закон, який свідчив, що якщо будинок, побудований архітектором, розвалиться і при цьому загине його власник, архітектор підлягає страті. Якщо загинуть і члени сім'ї власника будинку, то підлягають страті і члени сім'ї архітектора (відлунням цього закону в наш час є традиція: при випробуванні побудованого мосту автор стоїть під мостом).

Один з указів Петра I свідчив:

§1. Повелеваю хозяина Тульской оружейной фабрики Корнилу Белоглазова битъ кнутом и сослать на работу в монастырь, понеже он, подлец, осмелился войску государя продавать негодные пищали и фузеи. Старшего олдермана Фролова Фукса битъ кнутом и сослать в Азов, пусть не ставит клейма на плохие ружья.

§2. Приказываю Ружейной канцелярии из Петербурга переехать в Тулу и денно и ночью блюсти исправность ружей. Пусть дьяки и подьячие смотрят, как олдерман клейма ставит. Буде сомнение возьмет, самим проверять и смотром и стрельбою. А два ружья каждый месяц стрелять, пока не испортятся.

Так, більше двохсот п'ятдесяти років тому царським указом у Росії були встановлені вимоги до випробування зброї на надійність.

Поява на початку століття складних технічних систем різного призначення привела до зародження нової технічної науки – теорії надійності.

Провідний фахівець у галузі теорії ймовірностей академік Б. В. Гнеденко дав таке визначення теорії надійності як прикладної науки: "Загальна наукова дисципліна, що вивчає

загальні методи, які необхідно використовувати при проектуванні, виготовленні, прийманні, транспортуванні та експлуатації виробів для забезпечення їх максимальної ефективності в процесі використання, а також розробляючи загальні методи розрахунку якості виробів за відомими якістьми її складових частин". У наш час теорія надійності стала методологічною основою спрямованості загальноінженерних та спеціальних технічних дисциплін на забезпечення високої якості промислової продукції.

Перші дослідження у галузі надійності та розроблення її концепції належать до кінця Другої світової війни. Приводом для організації робіт у цій галузі стало усвідомлення в США того факту, що створена у роки війни військова техніка не забезпечувала достатньої ефективності її використання через численні відмови. Наприклад, до 60 % літаків, призначених для бойових дій на Далекому Сході, виявилися непрацездатними; 50 % електронної апаратури виходило з ладу під час зберігання ще до використання. Напрацювання електронних приладів, що застосовувалися у бомбардувальниках, складало всього 20 год.

Той факт, що електронна апаратура мала низьку надійність, став стимулом для першочергового розгортання робіт саме в цій галузі. У період 1943-1958 років виконувався статистично-ймовірний аналіз напрацювання до відмови, що базувався на експоненціальному законі розподілу. Моменти появи відмови та їхні причини розглядалися як випадкові події, як внутрішня властивість елементів у відриві від причин, що викликали появу відмов. Тобто вважається, що відмова є певною "неминучістю".

1958-1968 роки характеризуються широким розвитком робіт з експериментальної оцінки фактичної надійності, зі збирання й обробки експлуатаційної інформації про надійність. Основним його результатом є перегляд концепції про "випадковість" причин відмов та їхню неминучість. Багато "випадкових" відмов було пояснено, був установлений взаємозв'язок між конструкцією виробу, технологією та причинами відмов.

З 1968 року відбувається як подальший розвиток математичної теорії надійності, так і зближення цієї науки з технічними дисциплінами, надання надійності інженерного спрямування.

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. 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 і 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.

З початку зародження теорії надійності виділилися два напрямки:

- забезпечення надійності конструкторськими і технологічними методами і розроблення умов експлуатації;
- кількісні методи оцінки надійності із залученням спеціального математичного апарату.

У початковий період розвитку теорії надійності виникло певне протиставлення двох напрямків, насамперед через складності психологічної перебудови нашого мислення.

Конструктори і технологи зневажливо ставилися до математичних методів розрахунку надійності, так як поняття теорії надійності, пов'язані з випадковими явищами, були незвичні і некомфортні для їх мислення. У той період (а часто і зараз) розрахунки на міцність проводилися в детермінованій постановці з використанням коефіцієнтів запасу міцності.

Фахівцям прикладної теорії ймовірностей не вистачало знань у галузі різних наукових дисциплін, таких, як опір матеріалів, теорія пружності, механіка руйнування, теорія коливань, технологія металів тощо. Крім того, вони переоцінювали роль кількісних методів.

Теорією надійності називається наука, що встановлює закономірності виникнення відмов, досліджує залежність працездатності виробів від зовнішніх і внутрішніх факторів, розробляє методи розрахунку та експериментального визначення надійності, шляхи її підвищення при конструюванні та виготовленні, а також способи підтримки надійності на заданому рівні при експлуатації. Тому теорії надійності ще називають наукою про відмови.

Теоретичною базою теорії надійності є теорія ймовірностей і математична статистика, але це не означає, що теорія надійності є розділом прикладної математики.

Теорія надійності – це самостійна технічна наука, яка використовує і поєднує не тільки математичний апарат, але й досліджує конструкторські й технологічні методи створення високонадійних систем. Проте технічні вироби можуть значно відрізнятися за фізичною природою, тому в теорії надійності розвиваються окремі напрямки, пов'язані з дослідженням надійності конкретних типів виробів.

Одним з таких напрямків, який розглядається в цьому посібнику, є надійність вагонів. Цей напрямок має багато спільного з іншими напрямками, але у нього є і свої особливості, що обумовлені такими причинами:

- вагон є складною механічною (а пасажирські і рефрижераторні вагони - електромеханічною) системою із просторовим напружено-деформованим станом навантажених деталей;

- у вагонах широко використовуються різномірні конструкційні матеріали, сталі, пластики, гума тощо;
- вагони мають тривалий термін служби і високу інтенсивність їх експлуатації;
- існує розвинена система ремонту та діагностики всіх деталей вагона з використанням передових методів відновлення деталей;
- вантажний вагон має знеособлену схему експлуатації: вони не закріплені за певним депо та можуть пересуватися не лише по території України, але й на залізницях СНД. Це накладає певну специфіку на збирання відповідної інформації та організацією проведення випробувань;
- вагони пересуваються у складі поїзда в умовах "просторової обмеженості" – рухаються по одних і тих же рейках. Відмова будь-якого вагона спричиняє, по-перше, припинення роботи всього транспортного потоку, а по-друге, порушення безпеки руху.

Ще необхідно враховувати, що при розв'язанні задач забезпечення надійності виробів машинобудування практично не можливо використати досить потужний арсенал засобів підвищення надійності за рахунок структурної надлишковості, як це використовується в електротехніці та електроніці.

### **1.5. Завдання, що вирішуються теорією надійності**

До основних завдань, які вирішуються інженерами в галузі вагонобудування та вагонного господарства, можна віднести такі:

- кількісна оцінка характеристик надійності існуючого парку пасажирських та вантажних вагонів, а також їх вузлів;
- розроблення технічних вимог для створення нових вагонів із заданим рівнем надійності для певних умов експлуатації;
- розроблення методів контролю надійності вагонів та їх вузлів;
- оптимізація організації ремонтних і профілактичних робіт;



- оптимізація системи забезпечення запасними частинами та матеріалами;
- створення методів та засобів технічного діагностування виробів.

### **Питання для самоконтролю**

1. Чому однакові за конструкцією та умовами експлуатації вироби мають суттєво різний час роботи до відмови?
2. Що вивчає наука про надійність?
3. Коли наука про надійність сформувалася як самостійна галузь науки?
4. Які завдання вирішуються теорією надійності?
5. На які наукові дисципліни спирається теорія надійності?
6. У чому полягає комплексність властивості "надійність"?
7. Які особливості надійності вагонів?
8. Які основні завдання стосовно надійності вирішуються інженерами в галузі вагонобудування та вагонного господарства?

## 2. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

### 2.1. Поняття про технічні об'єкти

Для визначення термінів понятійний апарат теорії надійності регламентується за допомогою великої кількості нормативних документів.

У теорії надійності розглядаються такі узагальнені об'єкти:

- виріб – одиниця продукції, яка виготовляється певним підприємством (підшипник, редуктор, вагон, локомотив);
- елемент – найпростіша складова частина виробу;
- система – сукупність сумісно діючих елементів, призначених для виконання заданих функцій.

Поняття «елемент» та «система» можуть бути різними в залежності від міри узагальнення. Наприклад, вантажний вагон при вивченні власної надійності розглядається як система, що складається з багатьох елементів. У той же час аналізуючи той же вагон у складі поїзда, який рухається по залізниці, він уже буде елементом системи.

Вироби також поділяються на такі групи:

- вироби, що не можуть бути відновлені споживачем (наприклад, електролампи);
- вироби, що відновлюються споживачем (наприклад, верстати, автомобілі, локомотиви, вагони та інший рухомий склад).

Але ця класифікація досить умовна. Так, переважна більшість підшипників кочення належить до виробів, що не відновлюються. У той же час буксові підшипники рухомого складу, враховуючи їх високу вартість, регулярно проходять відновлення працездатності, але це виконується не споживачем, а на спеціалізованих підприємствах.

Одним з основних понять теорії надійності є технічний стан об'єктів. Під технічним станом розуміють сукупність властивостей виробу, які можуть змінюватися в процесі експлуатації, що характеризує у певний момент часу ознаки, встановлені нормативно-технічною документацією на цей виріб. Існують такі види технічного стану: справний, несправний, працездатний, граничний, аварійний. Вид технічного стану

об'єкта встановлюється шляхом проведення технічного діагностування фахівцями, які мають відповідну кваліфікацію. Існують такі види технічного стану об'єктів:

- справність – стан виробу, при якому він на даний момент часу задовольняє всі вимоги, встановлені нормативно-технічною документацією (НТД), як відносно основних параметрів, що забезпечують виконання заданих функцій, так і допоміжних параметрів;

- працездатність – стан виробу, при якому він на даний момент часу задовольняє всі вимоги, встановлені НТД відносно основних параметрів. Працездатність не стосується вимог, що безпосередньо не впливають на експлуатаційні показники (наприклад пошкодження зовнішнього фарбування вагона);

- непрацездатність – стан виробу, при якому він на даний момент часу не відповідає вимогам НТД відносно основних параметрів;

- несправність – стан виробу, при якому він на даний момент часу не відповідає хоча б одному з вимог НТД. Несправний об'єкт може бути працездатним, але ніколи не навпаки. Наприклад, пасажирський вагон залишається працездатним у випадку, коли не працює повітроохолоджувач системи кондиціонування повітря. У той же час пасажирський вагон безумовно буде непрацездатним при виявленні наднормативного нагріву буксового вузла;

- граничний стан – стан виробу, при якому подальше його використання повинно бути призупинено через вичерпання технічного ресурсу, загрозу безпеці руху, моральне спрацювання.

З технічним станом об'єктів тісно пов'язані події, які розглядаються теорією надійності:

- пошкодження – це подія, яка полягає у втраті справності виробу;

- відмова – це подія, що полягає у втраті працездатності.

Відмови поділяють на відмови функціонування, при яких виконання своїх функцій елементом припиняється, та параметричні, при яких певні параметри об'єкта змінюються у неприпустимих межах.

## **2.2. Причини втрати працездатності машини**

Ті зміни, що відбуваються в об'єкті з плином часу та призводять до втрати дієздатності машини, пов'язані із зовнішніми та внутрішніми впливами. Існує три джерела впливів.

1. Дія енергії навколишнього середовища, у тому числі людини, що виконує обов'язки оператора або ремонтника;

2. Внутрішні джерела енергії, пов'язані як з робочими процесами, що протікають у машині, так і з роботою окремих елементів машини;

3. Потенційна енергія, що накопичена у матеріалах та деталях машини в процесі виготовлення. При роботі машини спостерігаються такі основні види енергії:

а) механічна – у вигляді статичних та динамічних навантажень;

б) теплова - діє при коливанні температури навколишнього середовища і при здійсненні робочого процесу (двигуни внутрішнього сгорання);

в) хімічна - корозія, агресивні середовища;

г) електромагнітна - може виявляти вплив на роботу електричної апаратури;

д) біологічні фактори можуть впливати на дієздатність оператора.

## **2.3. Класифікація причин відмов**

Відмови можуть бути класифіковані за різними ознаками: за характером проявлення, способами виявлення, причинами виникнення тощо.

1. Причини відмов умовно можна поділити на випадкові та поступові. Випадкова відмова полягає у різкій, практично миттєвій зміні параметрів. До причин випадкових відмов можна віднести непередбачені перевантаження, дефекти матеріалу, помилки обслуговуючого персоналу або системи управління. Випадкові фактори викликають здебільшого відмови при дії у несприятливих поєднаннях (про це свідчать матеріали розслідування багатьох транспортних подій у вагонному господарстві).

Поступові відмови виникають унаслідок незворотних змін властивостей вагона, викликаних дією корозії, старіння, утомленості, повзучості, спрацьованості тощо. Тобто ці фактори діють на елементи конструкції вагона постійно.

2. За причинами виникнення відмови можна класифікувати таким чином:

- конструкційні відмови що викликані помилками при проектуванні: порушеннями вимог державних стандартів, помилками при розробленні принципів схем об'єктів або при обґрунтуванні схем навантаження (наприклад послаблення затягування торцевого кріплення циліндричних роликотидшипників букс вантажних вагонів викликано дією знакозмінних систематичних осьових навантажень, які були не передбачені при вихідних розрахунках), неправильним або нераціональним вибором конструктивних матеріалів і технологій їх обробки;

- технологічні відмови, що викликані недотриманням необхідної технології виготовлення або ремонту (наприклад, при монтуванні внутрішніх кілець буксових циліндричних роликотидшипників використовується теплова посадка, яка вимагає точного дотримання вимог НТД стосовно допусків на посадочні поверхні шийки осі колісної пари та внутрішнього кільця. Недотримання цих вимог може призвести до послаблення натягу посадки та провертання внутрішнього кільця на шийці осі, що, у свою чергу може призвести до зламу шийки осі), використанням некондиційних матеріалів або матеріалів з іншими характеристиками, недостатнім контролем у процесі виробництва;

- експлуатаційні відмови, які викликані нехтуванням правилами технічного обслуговування та експлуатації. Найбільш яскравим прикладом стосовно вагонів є недотримання вимог Правил технічної експлуатації щодо швидкості скочування вагонів із сортувальної гірки.

Конструкційні й технологічні відмови, як правило, виявляються у початковий період експлуатації.

3. За характером усунення розрізняють відмови остаточні та відмови, що усуваються власноруч. Остаточні відмови пов'язані з протіканням в елементах рухомого складу незворотних фізичних

процесів. Для усунення цих процесів необхідно проводити ремонт.

Відмови, що усуваються власноруч, інколи називаються збоями. Вони, як правило, виникають у системах керування й регулювання внаслідок внутрішніх і зовнішніх перешкод та зникають після усунення останніх. Подібні відмови не вимагають ремонту.

4. За взаємозв'язком відмови бувають залежні та незалежні. Незалежні відмови елементів викликаються процесами, що відбуваються безпосередньо в цьому елементі. Залежні відмови елемента виникають унаслідок відмов інших елементів.

5. По мірі впливу на працездатність рухомого складу відмови поділяються на повні та часткові.

Часткові відмови не призводять до повної втрати працездатності. Наприклад, відмова вагонного кондиціонера не впливає на здатність пасажирського вагона здійснювати перевезення, при цьому лише знижується комфортність.

Відмова, після виникнення якої вагон не здатен виконувати свої функції, називається повною.

6. Відмови в різних умовах можуть мати різні наслідки. Якщо сталася відмова одного з декількох верстатів, призначених для обточування поверхні кочення коліс у вагоноколісній майстерні, то його завдання можна поділити між іншими верстатами або організувати роботу верстатів у другу зміну. Відмова верстата на автоматичній лінії спричинить великі збитки через неспроможність функціонування автоматичної лінії в цілому. Відмова системи кондиціонування повітря у пасажирському вагоні позначиться на рівні комфорту у вагоні. У той же час відмова ходових частин вагона спричиняє загрозу безпеці руху.

## **2.4. Комплексний характер надійності**

Надійність – це одна з обов'язкових складових якості будь-якого технічного об'єкта. Однак надійність істотно відрізняється від усіх інших його властивостей, оскільки вона є найбільш загальною комплексною властивістю, що характеризує

корисність будь-якого технічного виробу, машини, приладу; надійність - це єдина спільна властивість більшості промислових виробів; надійність реалізується лише в часі, усі інші властивості мають миттєві значення; надійність не підлягає інструментальному вимірюванню, а визначається розрахунками (імовірнісними або статистичними) і випробуваннями дослідних зразків.

Комплексність властивості "надійність" виражається в тому, що технічний пристрій тим надійніший, чим рідше він відмовляє, чим довше зберігає працездатність, чим простіше і дешевше відновлюється після відмови. Для більш повної і детальної оцінки в розгляд вводяться часткові властивості, складові комплексної властивості "надійність": безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість.

Тобто надійність є комплексною властивістю об'єкта і характеризується безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю та збереженістю.

Безвідмовність – це властивість постійно зберігати дієздатність протягом заданого часу. Найчастіше в інженерній практиці використовуються такі показники безвідмовності:

- імовірність безвідмовної роботи;
- середнє напрацювання до відмови;
- інтенсивність відмов;
- параметр потоку відмов.

Довговічність – це властивість виробу тривало зберігати дієздатність до граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Існують такі показники довговічності:

- ресурс;
- призначений ресурс;
- $\gamma$ -відсотковий ресурс;
- термін служби;
- середній ресурс до капітального ремонту.

Ремонтпридатність – це властивість об'єкта, що полягає у пристосованості до попередження та виявлення причин виникнення відмов, пошкоджень та усунення їхніх наслідків шляхом проведення ремонтів і технічного обслуговування. До показників ремонтпридатності належать:

- імовірність відновлення працездатного стану у заданий час;
- середній час відновлення працездатності.

Збереженість – це властивість виробу постійно зберігати справний і дієздатний стан під час та після зберігання й транспортування. Найбільш поширені такі показники збереженості:

- $\gamma$ -відсотковий строк збереженості;
- середній строк збереженості.

Також для оцінки якості виробів використовуються комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання, коефіцієнт оперативної готовності.

### **Питання для самоконтролю**

1. Що розуміють під терміном "технічний стан об'єкта"?
2. Які існують види технічного стану об'єктів?
3. За якими ознаками можуть бути класифіковані відмови?
4. Які причини виникнення технологічних відмов?
5. Що є причинами експлуатаційних відмов?
6. Які часткові властивості є у комплексної властивості «надійність»?
7. До якої складової властивості надійності належить такий показник, як "інтенсивність відмов"?
8. Які існують показники ремонтпридатності?
9. Що таке "збереженість"?
10. Які існують комплексні показники надійності?



### 3. СТИСЛІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ ЙМОВІРНОСТЕЙ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ

#### 3.1. Випадкові події та їх характеристики

Для кількісного аналізу і математичного моделювання випадкових величин і подій у фізиці та прикладних інженерних науках застосовуються теорія ймовірностей та математична статистика. Теорія ймовірностей – це математична наука, що вивчає закономірності випадкових подій і процесів та розподілу випадкових величин. Математична статистика використовує методи збору й обробки статистичних даних для отримання числових характеристик випадкових величин, а також способи оцінки їх достовірності.

Теорія ймовірностей будується дедуктивно, виходячи з деяких аксіом і визначень. Найбільш строгий підхід пов'язаний з використанням теорії множин. Звичайно починають з побудови "елементарної теорії ймовірностей", у якій розглядаються випадкові події з кінцевим числом можливих наслідків. Наприклад, якщо ми кидаємо гральну кість, то є всього шість можливих результатів, а саме: 1, 2, 3, 4, 5 або 6. Потім теорія поширюється на випадок, коли число можливих результатів дискретне і необмежене (наприклад кількість відмов деякого технічного об'єкта за термін служби). Далі розглядається випадок, коли число можливих результатів експерименту нескінченне (наприклад число значень тривалості роботи деякого технічного об'єкта до відмови).

Для математичної статистики характерна, головним чином, індуктивна побудова, оскільки в цьому випадку процес іде у зворотному напрямку (від спостереження події до гіпотези). При цьому необхідно побачити за випадковими коливаннями величин дію причинного закону. Без знання теорії ймовірностей та математичної статистики не можуть бути правильно поставлені задачі теорії надійності і сформульовані основні її поняття, визначені кількісні показники якості.

Аналіз, розрахунок і прогнозування показників надійності вагонів, їх 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 викликаються факторами, більшість з яких у цілому носить випадковий характер (якість матеріалу, якість виготовлення і складання, режими роботи та величина навантажень, умови експлуатації та ін.). Тому тривалість роботи системи або деталі, що визначається моментом настання відмови, стає випадковою величиною.

Як би не намагалися забезпечити постійність 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 немає можливості передбачити абсолютно точно термін його служби, а має сенс говорити лише про ймовірність того чи іншого значення цього терміну.

Випадкова подія - це подія, яка в результаті виконаного експерименту може відбутися або не відбутися (позначимо випадкову подію символом  $A$ ).

Достовірна подія – це подія, яка обов’язково повинна відбутися (позначимо достовірну подію символом  $E$ ).

Неможлива подія - це подія, яка обов’язково повинна не відбутися (позначимо достовірну подію символом  $Z$ ).

Сумісні (несумісні) події – це події, поява однієї з них не виключає (виключає) можливість появи іншої.

Залежні (незалежні) події – це події, поява однієї з них впливає (не впливає) на появу іншої.

Протилежна подія відносно деякої обраної події  $A$  – це подія, що подія  $A$  не відбулася (позначимо протилежну подію  $\bar{A}$ ).

Повна група подій – це сукупність подій, коли в результаті експерименту обов’язково повинна відбутися хоча б одна подія цієї сукупності. Так, наприклад, події  $A$  та  $\bar{A}$  складають повну групу подій.

Ймовірність події – числова характеристика міри можливості реалізації випадкової події в певних умовах.

Ймовірності випадкових подій мають такі властивості:

$$P(Z) = 0; \quad (3.1)$$

$$P(E) = 1; \quad (3.2)$$

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1; \quad (3.3)$$

$$0 = P(Z) \leq P(A) \leq P(E) = 1. \quad (3.4)$$

Випадкова величина - це величина, що в результаті експерименту може набути низку можливих значень. Наприклад, число випадінь герба  $n_r$  при  $n$  киданнях монети; тривалість роботи до першої відмови деякої машини і т.д. На відміну від випадкових величини, які набувають певного значення, називаються детермінованими. Усі величини (як випадкові, так і детерміновані) можна підрозділити на дискретні та безперервні. Дискретна випадкова величина в результаті експерименту може набути кінцеве число можливих значень. Наприклад, студент у результаті іспиту може отримати такі оцінки: "відмінно" (5), "добре" (4), "задовільно" (3) або "незадовільно" (2). Але ні в якому разі він не може отримати оцінку "3,75".

Безперервна випадкова величина може набути безліч можливих значень, які "щільно" заповнюють числову вісь. Наприклад, число відмов вагона  $n_{\text{від}}^i$  за  $T$  годин роботи є дискретною величиною, яка може набувати тільки невід'ємні цілочислові значення, тобто  $n_{\text{від}}^i = (0, 1, 2, \dots, i)$ , а тривалість роботи до першої відмови - безперервна випадкова величина, яка може набути будь-яке значення з нескінченної множини позитивних величин, як завгодно близько розташованих на числовій осі.

### 3.2. Основні теореми теорії ймовірностей

Теорія ймовірностей визначає й описує моделі, пов'язані з поняттям імовірності. Зокрема, у ній розглядаються методи обчислення ймовірності деякої події за відомими або заданими ймовірностями 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  $B$  за теорією ймовірностей

називається третя подія, що полягає у виконанні або події  $A$ , або події  $B$ , або подій  $A$  і  $B$  сумісно, що символічно вписується у вигляді

$$C = A + B. \quad (3.5)$$

Добутком двох подій  $A$  і  $B$  називається третя подія  $C$ , яка перебуває в спільному здійсненні подій  $A$  і  $B$ , що позначається як

$$C = A \times B. \quad (3.6)$$

При введенні поняття "імовірність події" було зазначено, що одне з його визначень базується 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, всередині кордонів яких міститься безліч точок – елементарних подій. Як приклад на рис. 3.1. наведено фігури, що ілюструють несумісні події  $A$  і  $B$ , сумісні події  $A$  і  $B$ , сумісні події  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , а також їх суми та добутки.

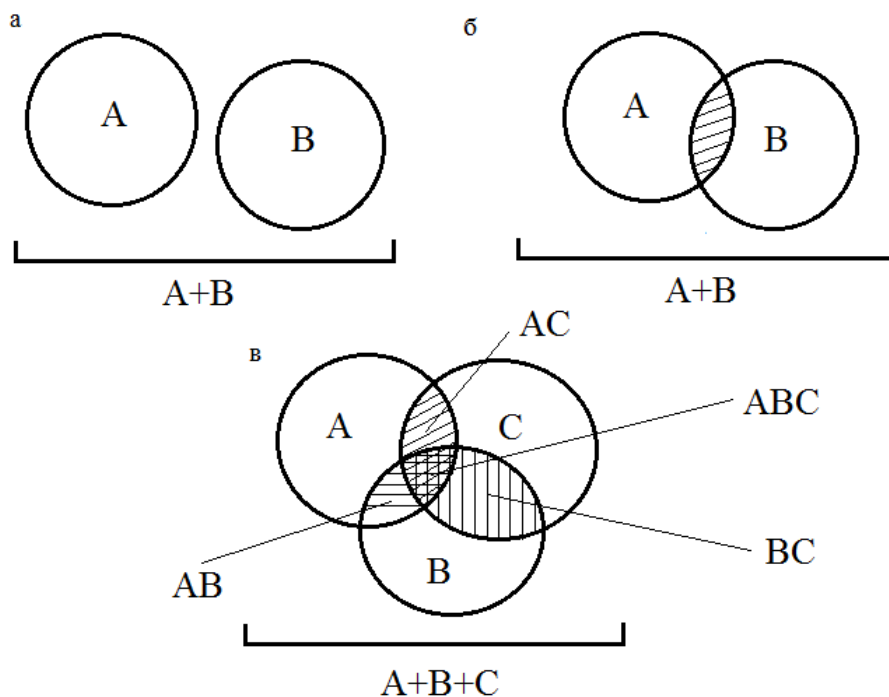


Рис. 3.1. Геометрична інтерпретація подій: а - несумісні події  $A$  і  $B$ ; б- сумісні події  $A$ ; в - сумісні події  $A$ ,  $B$ ,  $C$

Введені поняття суми і добутку подій можна поширити на кількість подій більше двох (у принципі, це може бути нескінченним).

**Теорема додавання ймовірностей.** Ймовірність суми двох подій дорівнює сумі ймовірностей цих подій за вирахуванням ймовірності їх спільної появи, тобто

$$P\{A + B\} = P\{A\} + P\{B\} - P\{A \cdot B\}. \quad (3.7)$$

Таким чином, щоб знайти ймовірність того, що подія належить множині  $A$  чи множині  $B$ , насамперед потрібно скласти ймовірності подій  $A$  і  $B$ . Однак деякі події, що належать одночасно як  $A$ , так і  $B$ , були б при цьому враховані двічі; тому необхідно із суми ймовірностей відняти ймовірність спільного здійснення подій, тобто  $P\{AB\}$ .

У разі, коли події  $A$  і  $B$  несумісні, то

$$P\{AB\} = 0 \text{ та } P\{A + B\} = P\{A\} + P\{B\}. \quad (3.8)$$

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

$$P\{A + \bar{A}\} = P\{A\} + P\{\bar{A}\} = 1. \quad (3.9)$$

З формули (3.9) випливає, що

$$P\{\bar{A}\} = 1 - P\{A\}. \quad (3.10)$$

Теорему додавання ймовірностей можна поширити на випадок декількох подій. Так, для випадку  $m$  подій  $(A_1, A_2, \dots, A_m)$  ймовірність їх суми виражається формулою

$$P\{A_1 + A_2 + \dots + A_m\} = \sum_i P\{A_i\} - \sum_{i < j} P\{A_i \cdot A_j\} + \\ + \sum_{i < j < k} P\{A_i \cdot A_j \cdot A_k\} - \dots + (-1)^{m+1} \times P\{A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_m\}. \quad (3.11)$$

Для випадку трьох сумісних подій ( $m = 3$ ) згідно з (3.11) одержимо

$$P\{A_1 + A_2 + A_3\} = P\{A_1\} + P\{A_2\} + P\{A_3\} - P\{A_1 \cdot A_2\} - \\ - P\{A_2 \cdot A_3\} - P\{A_1 \cdot A_3\} + P\{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3\}. \quad (3.12)$$

Для випадку, коли події  $A_1, A_2, \dots, A_m$  є несумісними та ймовірності їх сумісного здійснення дорівнюють нулю, ймовірність їх суми

$$P\{A_1 + A_2 + \dots + A_m\} = \sum_i P\{A_i\}. \quad (3.13)$$

**Теорема множення ймовірностей.** Введемо спочатку поняття умовної ймовірності. Припустимо, що подія  $A_1$  може здійснюватися в експерименті  $n_1$  способами, подія  $A_2$  -  $n_2$  способами, подія  $\{A_1, A_2\}$  -  $n_{1,2}$  способами, при цьому загальне число можливих результатів – число  $N$ . Тоді

$$P\{A_1\} = \frac{n_1}{N}. \quad (3.14)$$

$$P\{A_1 A_2\} = \frac{n_{12}}{N}. \quad (3.15)$$

Перетворимо вираз (3.15):

$$P\{A_1 A_2\} = \frac{n_{12}}{N} = \frac{n_1}{N} \cdot \frac{n_{12}}{n_1} = P\{A_1\} \cdot \frac{n_{12}}{n_1}. \quad (3.16)$$

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 ймовірність  $A_2$  за умови, що відбулася подія  $A_1$ . Ця ймовірність позначається у вигляді  $P\{A_2/A_1\}$  та

називається умовною ймовірністю події  $A_2$  за умови, що відбулася подія  $A_1$ . З формули (3.16) отримуємо

$$P\{A_1 A_2\} = P\{A_1\} \cdot P\{A_2/A_1\}. \quad (3.17)$$

Тобто ймовірність добутку (спільного здійснення) подій  $A_1$ ,  $A_2$  дорівнює добутку ймовірності події  $A_1$  на умовну ймовірність події  $A_2$  за умови, що відбулася подія  $A_1$ . Геометрична інтерпретація поєднання (добутку) подій  $A_1$  та  $A_2$  показана на рис. 3.2.

Оскільки  $A_1 A_2$  є частиною  $A_1$ , то

$$P\{A_1 A_2\} \leq P\{A_1\}. \quad (3.18)$$

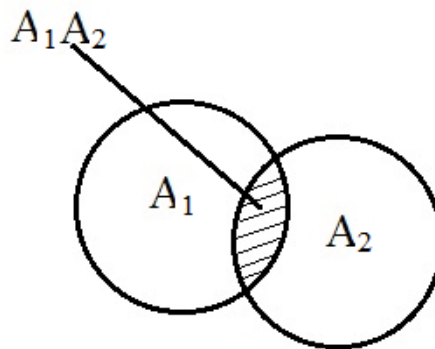


Рис. 3.2. Геометрична ілюстрація сумісних подій

З (3.17) з урахуванням (3.18) отримуємо

$$P\{A_1/A_2\} \leq \frac{P\{A_1 \cdot A_2\}}{P\{A_1\}}. \quad (3.19)$$

Формула (3.19) застосовується при обчисленнях умовних ймовірностей. Якщо подія  $A_1$  відбулася, але не вплинула на ймовірність події  $A_2$ , то говорять, що подія  $A_2$  не залежить від події  $A_1$ , тобто події  $A_1$  і  $A_2$  є незалежними. Тоді умовна ймовірність  $P\{A_2/A_1\}$  буде дорівнювати ймовірності  $P\{A_2\}$  і вираз (3.17) для незалежних подій набуде вигляду

$$P\{A_1 A_2\} = P\{A_1\} \cdot P\{A_2\}. \quad (3.20)$$

Тобто ймовірність додатку двох незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій.

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

$$P\{A_1 A_2 A_3\} = P\{A_1\} \cdot P\{A_2/A_1\} \cdot P\{A_3/A_1 \cdot A_2\}. \quad (3.21)$$

Три події є взаємно незалежними у тому і тільки в тому випадку, якщо

$$P\{A_1 A_2 A_3\} = P\{A_1\} \cdot P\{A_2\} \cdot P\{A_3\}. \quad (3.22)$$

Ймовірність добутку  $n$  незалежних подій визначається як добуток їх імовірностей

$$P\{A_1 A_2 \dots A_i \dots A_n\} = \prod_{i=1}^n P\{A_i\}. \quad (3.23)$$

Якщо всі  $n$  подій рівно ймовірні, то

$$P\{A_1 A_2 \dots A_i \dots A_n\} = [P\{A_i\}]^n. \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

**Формула повної ймовірності.** Якщо при виконанні експерименту можливо зробити  $n$  припущень, які виключають один одне, тобто гіпотези  $H_1, H_2 \dots H_i \dots H_n$  та подія  $A$  може відбутися в будь-який з них, то повна ймовірність події  $A$  обчислюється за формулою

$$P\{A\} = P\left\{\frac{A}{H_1}\right\} + P\{H_1\} \cdot P\left\{\frac{A}{H_2}\right\} + \dots + P\{H_n\} \cdot P\left\{\frac{A}{H_n}\right\} = \sum_{i=1}^n P\{H_i\} \cdot P\left\{\frac{A}{H_i}\right\}. \quad (3.25)$$



де  $P\{H_i\}$  – імовірність здійснення гіпотези  $H_i$ ;  $P\{A/H_i\}$  – умовна ймовірність події  $A$  при цій гіпотезі.

### Питання для самоконтролю

1. Як називається числова характеристика міри можливості реалізації випадкової події в певних умовах?
2. Що називається сумою та добутком двох подій  $A$  і  $B$  за теорією ймовірностей?
3. Коли використовується теорема додавання ймовірностей?
4. Коли події  $A_1$  і  $A_2$  є незалежними?
5. Що показує формула повної ймовірності?
6. Як визначається ймовірність добутку  $n$  незалежних подій?
7. Що таке "незалежні події"?
8. Що таке "достовірна подія"?
9. Що таке "неможлива подія"?
10. Що таке "сумісні (несумісні) події"?
11. Що таке "залежні події"?
12. Що таке "протилежна подія"?
13. Що таке "повна група подій"?
14. Що таке "ймовірність події"?

## 4. ВИПАДКОВІ ВЕЛИЧИНИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Відмови технічних об'єктів визначаються випадковим несприятливим збігом декількох факторів. Випадковість пов'язана з тим, що причини події залишаються для нас прихованими. Тому у розрахунках надійності ряд параметрів повинен розглядатися як випадкова величина, тобто така величина, що може набути те або інше значення, невідоме заздалегідь.

### 4.1. Закони розподілу дискретних випадкових величин

До біноміального закону розподілу призводить така математична модель: проводиться  $n$  однотипних незалежних випробувань, по закінченні кожного випробування об'єкт може перебувати або в стані  $A$  або в стані  $\bar{A}$ , причому ймовірність потрапити в стан  $A$  для об'єктів постійна й однакова  $P(A) = p$ . У цих умовах випадкова величина  $k$  – кількість випробувань, у яких об'єкт опиниться в стані  $A$ , розподілена за біноміальним законом. Така модель може бути інтерпретована й іншим чином: проводиться  $n$  незалежних однотипних експериментів, у кожному з яких з імовірністю  $p$  може настати подія  $A$ . Тоді випадкова величина  $k$  – кількість експериментів з  $n$ , в яких відбудеться подія  $A$ , яка буде розподілена за біноміальним законом. Імовірність того, що  $m$  набуде конкретне значення з можливого ряду  $0, 1, \dots, n$ , позначається  $P_n(k)$  і визначається за формулою, названою ім'ям її автора – формулою Бернуллі:

$$P_n(k) = C_n^k \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k}, \quad (4.1)$$

де  $n$  – кількість об'єктів, що випробовуються, або кількість проведених випробувань;

$p$  – імовірність події, що являє інтерес;

$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  – число сполучень з  $n$  елементів по  $k$ .

При  $n \rightarrow \infty$  біноміальний закон сходиться до нормального з

параметрами  $m_t = np$ ,  $\sigma_t = \sqrt{np(1-p)}$ . Збіжність біноміального закону до нормального достання вже за умови  $\frac{1}{n+1} < p < \frac{n}{n+1}$ .

Якщо кількість об'єктів, що випробовуються, наближається до безкінечності ( $n \rightarrow \infty$ ), імовірність події теж буде наближатися до безкінечності ( $p \rightarrow \infty$ ). Якщо добуток  $n \times p$  залишається постійною величиною, біноміальний закон сходиться до розподілу Пуассона з параметром  $\alpha = np$ . Пуассонівська апроксимація біноміального закону прийнятна вже за  $n > 10$ ,  $p < 0,1$ .

До закону Пуассона (закон рідкісних подій) приводять ті ж самі математичні моделі, що і до біноміального розподілу, але при малих імовірностях ( $p < 0,1$ ) і великій кількості об'єктів випробувань ( $n > 10$ ). У цьому випадку ймовірність  $P(k)$ , що задається законом Пуассона з параметром  $\alpha = np$ , являє собою ймовірність появи  $m$  подій з  $n$ ; область можливих значень  $k = 0, 1, \dots, n$ .

Крім того, закон Пуассона може описувати розподіл принципово іншої дискретної випадкової величини – кількості випадкових подій за деякий довільний інтервал  $\alpha$  (часу  $t$ , простору  $S$  тощо), якщо відоме середнє число подій на одиницю цього інтервалу  $\nu$  (наприклад, середнє число відмов  $\omega$  об'єкта в одиницю часу експлуатації або середнє число дефектів  $r$  на  $1 \text{ м}^2$  листа металу). Тоді  $\alpha = \nu \cdot \Delta x$  буде параметром закону Пуассона,  $\alpha$  – середнє число подій за  $\Delta x$ , а  $k$  - випадкова величина з областю можливих значень  $0, 1, 2, \dots, \infty$ . Імовірність  $P(m)$ , наприклад, що кількість відмов об'єкта за  $t$  років експлуатації буде точно дорівнювати  $m$ , описується законом Пуассона з параметром  $\alpha = \omega t$ .

$$P(k) = \frac{\alpha^k}{k!} \cdot \exp(-\alpha). \quad (4.2)$$

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта дорівнюватиме

$$P(k=0) = \exp(-\alpha), \quad k=0. \quad (4.3)$$

При великих значеннях  $\alpha > 10$  закон Пуассона наближається до нормального з параметрами  $m_t = \alpha$ ,  $\sigma_t = \sqrt{\alpha}$ .

Закон Пуассона – стійкий розподіл, тобто композиція законів розподілів Пуассона є також розподілом Пуассона.

Зазначимо, що пуассонівським потоком з постійним параметром або найпростішим стаціонарним потоком називається потік подій, що задовольняє три властивості:

- стаціонарність (середнє число подій в одиницю часу  $\omega = \text{const}$ ).

- відсутність післядії (виникнення однієї події не впливає на появу подальших);

- ординарність (неможливість виникнення одночасно двох або більше подій).

Для такого потоку, яким часто описують потоки відмов реальних об'єктів, імовірність виникнення  $m$  подій за час  $t$  підпорядковується закону Пуассона

$$P(k) = \frac{(\omega \cdot t)^k}{k!} \cdot \exp(-\omega t). \quad (4.4)$$

Величина  $\omega$  називається параметром потоку відмов. Зазвичай потік відмов об'єкта складається з великої кількості незалежних відмов елементів, з яких він складається. Кожен з них може і не бути простим, однак їх сума за умови, що параметр окремого потоку  $\omega$  малий у порівнянні із параметром загального потоку, відповідно до граничної теореми Пальма буде найпростішим (пуассонівським) потоком.

## 4.2. Розподіл безперервних випадкових величин

Теорію надійності інколи називають теорією відмов, оскільки вона досліджує закономірності часу виникнення відмов. Як уже стверджувалось раніше, момент виникнення відмови є випадковою величиною, яка може набути будь-яке значення.

Для кожного числа  $x$  у діапазоні зміни випадкової величини  $x$  існує певна ймовірність  $P(X < x)$ , що  $x$  не перевершує  $X$ . Ця залежність  $F(x) = P(X < x)$  має назву функція розподілу випадкової величини  $X$ . Функція  $F(x)$  є функцією  $x$ , що не убиває (монотонно зростаючою для безперервних процесів).

Похідна від функції розподілу називається щільністю розподілу випадкової величини

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} > 0. \quad (4.5)$$

Щільність розподілу характеризує швидкість зростання функції розподілу у кожній точці  $x$ , а добуток  $f(x)dx$  – приріст  $dF(x)$  цієї ймовірності за  $dx$ . Підсумовування таких приростів у всьому діапазоні зміни величини  $X$  враховує всі її можливі значення, тобто ймовірність того, що випадкова величина  $X$  набуде значення в межах  $(0 \leq X \leq \infty)$ , дорівнюватиме одиниці:

$$P(0 \leq X \leq \infty) = \int_0^{\infty} dF(x) = \int_0^{\infty} f(x) dx = 1. \quad (4.6)$$

На рис. 4.1 наведені характерні графіки функцій  $F(x)$  та  $f(x)$  для загального випадку, коли випадкова величина може набути і від'ємні значення, тобто вона розподілена у діапазоні  $(-\infty \leq X \leq +\infty)$ .

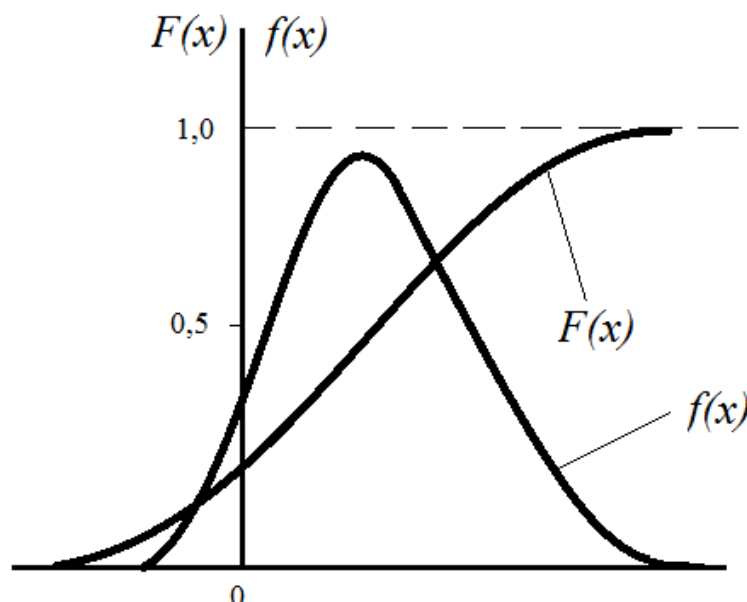


Рис. 4.1. Графіки функції та щільності розподілу безперервної випадкової величини

З визначення та фізичного змісту функції розподілу

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = P(-\infty \leq X \leq x). \quad (4.7)$$

випливають її основні властивості:

1.  $F(-\infty) = 0$ ;  $F(+\infty) = 1$  - на підставі (4.6);
2.  $F(x_1) \leq F(x_2)$ , якщо  $x_1 < x_2$ , тобто  $F(x)$  є позитивна функція, яка не убиває;
3.  $F(x_2) - F(x_1) = P(x_1 \leq X \leq x_2)$ , різниця між значеннями функції розподілу при  $X = x_2$  та  $X = x_1$  ( $x_2 > x_1$ ) дорівнює ймовірності потрапляння  $X$  в інтервал  $(x_1, x_2)$ .

Щільність розподілу у відповідності до (4.5) є першою похідною функції розподілу, тобто

$$f(x) = F'(x). \quad (4.8)$$

Вона має такі властивості:

- щільність розподілення є невід'ємною функцією, тобто  $f(x) \geq 0$  на всьому діапазоні можливих значень  $X$ ;
- інтеграл від  $f(x)$  у межах усього діапазону можливих значень  $X$  дорівнює одиниці, тобто

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = F(+\infty) = P\{X \leq \alpha\} = 1. \quad (4.9)$$

Щільність розподілу є величиною, яка має відповідну вимірність. Вона зворотна вимірності випадкової величини, що аналізується.

### **4.3. Числові характеристики розподілень випадкових величин**

Основною характеристикою випадкової величини є її математичне очікування. Значення математичного очікування, що визначаються за результатами спостережень як для

дискретних, так і для безперервних випадкових величин, називають оцінкою математичного очікування. Для дискретних випадкових величин

$$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{N}, \quad (4.10)$$

де  $N$  - загальне число спостережень,  $x_i$ - значення випадкової величини.

Для безперервних випадкових величин

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x), \quad (4.11)$$

Дисперсія випадкової величини - це математичне очікування квадрата відхилення випадкової величини від свого математичного очікування. Для дискретних випадкових величин

$$D_x = \frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2. \quad (4.12)$$

Для безперервних випадкових величин

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 \cdot f(x). \quad (4.13)$$

Слово "дисперсія" означає розсіювання та характеризує розкид випадкової величини. Дисперсія має вимірність квадрата випадкової величини. Крім того, на практиці часто використовують середнє квадратичне відхилення, що являє собою корінь квадратний з дисперсії, тобто  $S_x = \sqrt{D_x}$ .

Математичне очікування та дисперсію в математичній статистиці називають моментами першого та другого порядків.

Для оцінки розсіювання за допомогою величини, що не має розміру (відносної), використовують коефіцієнт варіації, що дорівнює відношенню середнього квадратичного відхилення до математичного очікування  $v_x = S_x / \bar{x}$ .

У теорії ймовірностей розглядається велика кількість законів розподілу випадкових величин, які використовуються в техніці. При цьому форма, структура та параметри закону розподілу визначаються умовами процесу, у якому реалізується ця випадкова величина.

### Питання для самоконтролю

1. Чому у розрахунках надійності ряд параметрів повинен розглядатися як випадкова величина?
2. Що визначається за формулою Бернуллі?
3. Якому закону підпорядковуються потоки відмов реальних об'єктів?
4. Яку назву має ця залежність:  $F(x) = P(X < x)$ ?
5. Що характеризує щільність розподілу випадкової величини?
6. Що характеризує собою математичне очікування випадкової величини?
7. Що характеризує собою дисперсія випадкової величини?
8. Що характеризує собою асиметрія випадкової величини?
9. Що характеризує собою ексцес випадкової величини?
10. Яка величина має назву "момент першого порядку"?
11. Що характеризує закон Пуассона?



## 5. КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ

### 5.1. Показники надійності виробів, що не відновлюються

Для оцінки надійності об'єктів, які не відновлюються, використовуються ймовірнісні характеристики випадкової величини – напрацювання  $T$  об'єкта від початку експлуатації до першої відмови. Для вагонного парку напрацювання, як правило, вимірюється в кілометрах пробігу.

Ймовірність безвідмовної роботи являє собою ймовірність події, що в межах заданого напрацювання при встановлених умовах експлуатації не виникне відмова, тобто час безвідмовної роботи перевищуватиме встановлене напрацювання

$$P(t) = P(T \geq t). \quad (5.1)$$

Ймовірність безвідмовної роботи є найбільш повною характеристикою надійності. Інколи вона розглядається як синонім поняття "надійність". Так, якщо стверджується, що надійність вагона дорівнює 0,95, то це означає, що ймовірність безвідмовної роботи за заданий час при встановлених умовах експлуатації дорівнюватиме 0,95.

Даний показник ураховує як внутрішні, так і зовнішні фактори, що впливають на надійність та надають наочне уявлення про характер зміни надійності у часі. Тому цей показник називають "функцією надійності".

Функція надійності має такі властивості:

1.  $P(0) = 1$ , тобто перед початком експлуатації всі об'єкти працездатні;
2.  $P(\infty) = 0$ , тобто всі об'єкти коли-небудь повинні відмовити;
3.  $P(t)$  – є функцією, яка монотонно убиває (рис.5.1).

За статистичними даними ймовірність безвідмовної роботи обчислюється таким чином. Розглянемо схему випробувань. На випробуваннях перебуває  $N_0$  об'єктів і випробування вважаються закінченими, якщо всі вони відмовили. При цьому об'єкти, що

відмовили, новими або відремонтованими не замінюються (рис. 5.2).

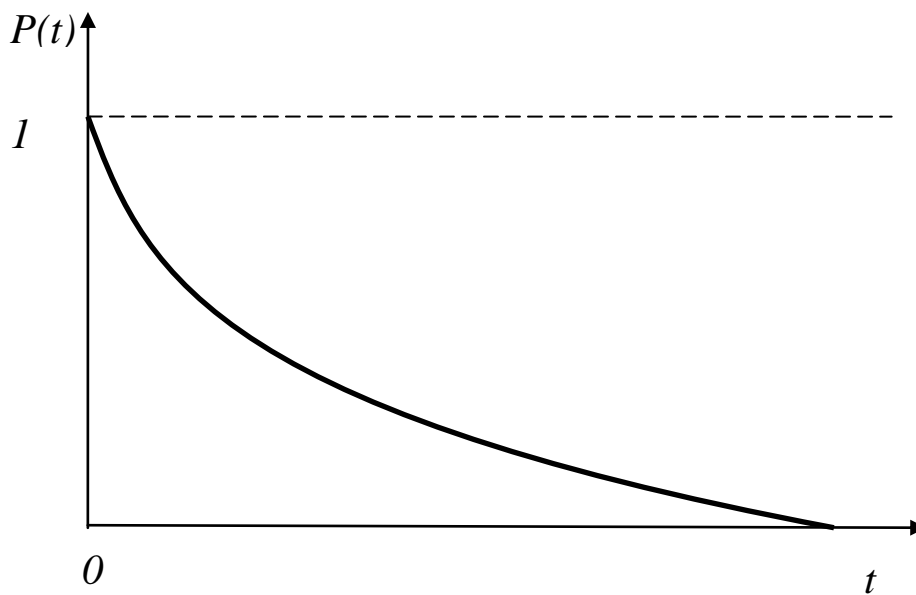


Рис. 5.1. Залежність зміни ймовірності безвідмовної роботи

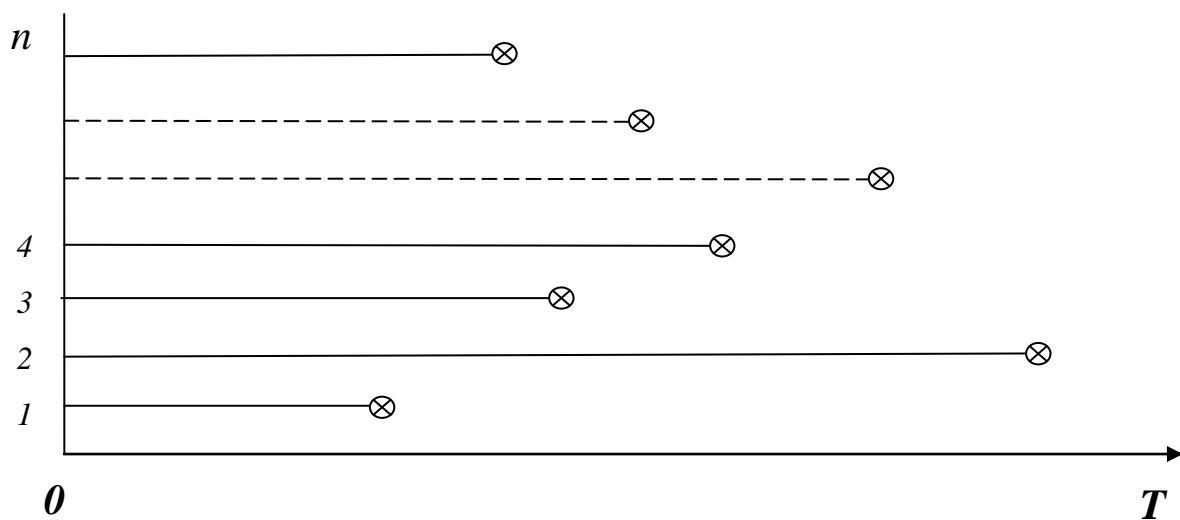


Рис. 5.2. Схема проведення випробувань

Ймовірність безвідмовної роботи за статистичними даними визначається за формулою

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (5.2)$$

де  $n(t)$  - число виробів, що відмовили за час  $t$ .

Тоді ймовірність відмови дорівнюватиме

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (5.3)$$

За статистичними даними ймовірність відмови обчислюється так:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (5.4)$$

У теорії надійності активно використовують поняття щільності розподілу відмов. Це перша похідна від функції розподілу, яка є середньою кількістю відмов у одиницю часу.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}. \quad (5.5)$$

Щільність розподілу є функцією, що не убуває,

$$\int_0^{+\infty} f(t) dt = 1. \quad (5.6)$$

Графік щільності розподілу в теорії ймовірностей називають кривою розподілу. Імовірність безвідмовної роботи можна виразити через щільність розподілу таким чином:

$$p(t) = 1 - \int_0^{+\infty} f(t) dt. \quad (5.7)$$

Відповідно ймовірність відмови

$$q(t) = \int_0^{+\infty} f(t)dt. \quad (5.8)$$

За статистичними даними щільність розподілу для  $i$ -го інтервалу часу визначається як

$$f(t) = \frac{\Delta n_i}{N_0 \cdot \Delta t_i}, \quad (5.9)$$

де  $\Delta n_i$  - кількість об'єктів, що відмовили за час  $(t_0, t_i + \Delta t_i)$ ;  
 $N_0$  - кількість об'єктів, що випробовуються;  
 $\Delta t_i$  - інтервал часу, що розглядається.

Щільність розподілу являє собою відношення виробів, що відмовили, в одиницю часу, до початкової кількості виробів, які випробовуються, за умови, що всі вироби, що відмовили, не відновлюються.

Інтенсивність відмов являє собою умовну щільність імовірності розподілу часу безвідмовної роботи в момент часу  $t$  за умови, що до цього моменту виріб не відмовив,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{pt} = -\frac{dp(t)/dt}{p(t)}. \quad (5.10)$$

Таким чином, при використанні інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  розглядаються лише об'єкти, що залишилися працездатними до моменту часу  $t$ . Вироби, що відмовили, далі не розглядаються.

За статистичними даними інтенсивність відмов визначається як відношення виробів, що відмовили в одиницю часу, до середнього числа виробів, що працюють,

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n_i}{N_{cp} \cdot \Delta t_i}, \quad (5.11)$$

де  $N_{cp}$  - середнє число виробів, що безвідмовно працюють в інтервалі часу  $\Delta t_i$ .

Інтенсивність відмов є однією з найголовніших

характеристик надійності вагона. Вона являє собою узагальнену характеристику, що містить у собі інформацію одразу про два показники  $f(t)$  та  $q(t)$ . Крім того,  $\lambda(t)$  є найбільш чіткою характеристикою закону розподілу часу безвідмовної роботи виробу та називається  $\lambda$  - характеристикою.

Характерна для елементів вагона  $\lambda$  – характеристика наведена на рис. 5.3.

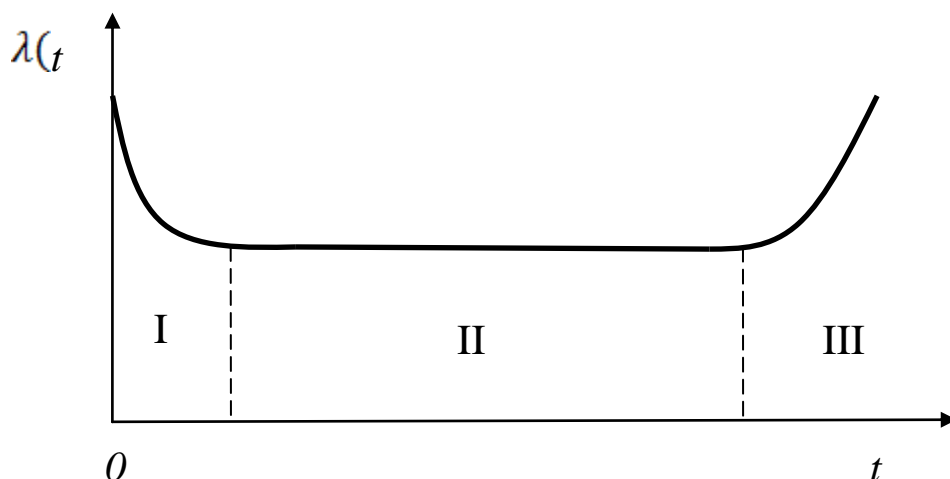


Рис. 5.3. Залежність інтенсивності відмов від часу

Перша ділянка (період припрацювання) характеризується відносно великою кількістю відмов, яка зменшується до кінця ділянки. Це обумовлено тим, що в цей період відмовляють об'єкти, які мали певні приховані дефекти. Тобто на цій ділянці проявляються конструктивні або виробничі відмови, виконується усунення помилок та недоліків конструювання.

Друга ділянка характеризується постійним (або практично постійним) малим значенням інтенсивності відмов та називається періодом нормальної експлуатації. У цей період проявляються головним чином раптові відмови, що мають випадковий характер. Тривалість цієї ділянки залежить від середнього терміну служби комплектувальних елементів, якості технологічного процесу та умов експлуатації об'єкта.

На третій ділянці інтенсивність відмов суттєво збільшується з часом через процеси спрацювання та старіння

практично у всіх елементах об'єкта. Ця дільниця є періодом старіння.

Інтенсивність відмов та ймовірність безвідмовної роботи пов'язані між собою. Вираз (5.10) можливо записати таким чином:

$$\lambda(t)dt = -\frac{dp(t)}{p(t)}.$$

Проінтегруємо цю формулу при вихідних умовах  $p(t=0) = 1$

$$-\int_0^t \lambda(t) = \ln p(t).$$

Тоді

$$p(t) = \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) \right]. \quad (5.12)$$

Як показники надійності виробів, що не відновлюються, використовують також числові характеристики випадкового напрацювання до відмови.

Середній час безвідмовної роботи (середнє напрацювання) є математичне очікування напрацювання до першої відмови

$$m_t = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (5.13)$$

За результатами випробувань оцінка середнього часу безвідмовної роботи обчислюється так:

$$m_t = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}. \quad (5.14)$$

де  $t_i$ - час справної роботи  $i$ -го елемента.

Усі зазначені вище показники є показниками безвідмовності. До показників довговічності належить так званий  $\gamma$ -відсотковий ресурс. Він являє собою напрацювання, протягом якого гарантується безвідмовна робота з імовірністю  $\gamma$ .  $\gamma$ -відсотковий ресурс є функцією, яка зворотна функції надійності при заданому аргументі

$$t_\gamma = p^{-1}(\gamma). \quad (5.15)$$

Графічно  $\gamma$ -відсотковий ресурс  $t_\gamma$  виражає абсцису функції  $P(t)$  при заданій ординаті  $\gamma$  (рис. 5.4).

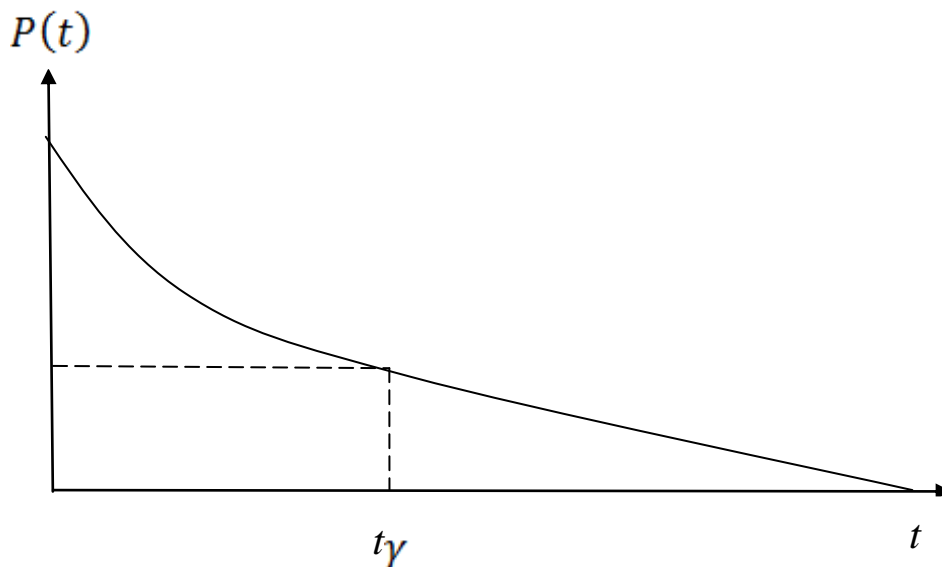


Рис. 5.4. Графічне зображення  $\gamma$ -відсоткового ресурсу

## 5.2. Характеристики надійності виробів, що відновлюються

Для оцінки надійності виробів, що відновлюються, можуть використовуватися зазначені вище показники. При цьому вони характеризують надійність виробів до першої відмови.

Розглянемо процес експлуатації об'єктів, які допускають усунення відмов під час використання, і викликані відмовою

перерви в роботі. Такий процес можна подати у вигляді послідовності інтервалів часу (рис. 5.5).

Періоди, коли об'єкти не відмовляють і не відновлюються, не розглядаються.

Напрацювання  $T$  об'єкта, який відновлюється в процесі експлуатації складається з інтервалів  $t_i$  його безвідмовної роботи і є випадковою величиною. Природно, для таких об'єктів важливе значення має не тільки напрацювання, але і час відновлення. Чим швидше ремонтується об'єкт після відмови, тим за інших рівних умов він ефективніше виконує свої функції. Час відновлення працездатності вагонів після відмов складається з таких операцій:

- виявлення відмови;
- пошук причин і місця відмови;
- усунення відмови;
- перевірка працездатності агрегату (системи) вагона.

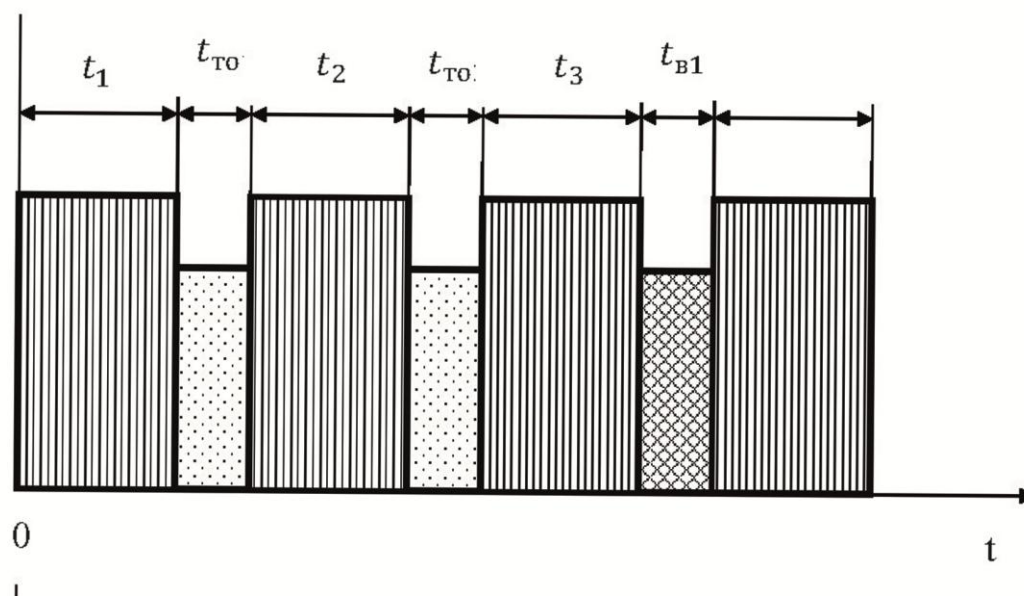


Рис. 5.5. Приклад реалізації випадкового процесу експлуатації об'єкта, що відновлюється в процесі застосування:  
 1 -  $t_i$  - інтервали часу, у які об'єкт перебуває в працездатному стані; 2 -  $t_{mai}$  - інтервали часу технічного обслуговування; 3 -  $t_{ai}$  - інтервали часу ремонту (відновлення)



працездатності) після чергової відмови.

Тривалість кожної з операцій залежить від кваліфікації обслуговуючого персоналу, місця та характеру відмови, досконалості системи діагностики і процесу ремонту, кількості запасних частин і т. д., тому час ремонту є випадковою величиною. Крім того, передбачається, що за час ремонту працездатність елементів вагона відновлюється до початкового рівня (окремим випадком ремонту є заміна елемента, який відмовив, новим), унаслідок чого інтервали ( $t_1$  і  $t_2$ ) будуть незалежними. При цьому число відмов за заданий час є дискретною випадковою величиною. Послідовність відмов, які настають одна за одною у випадкові моменти часу, утворює потік відмов.

Практично важливим є окремий випадок, коли середній час, що витрачається на ремонт вагона (особливо поточний), дуже малий у порівнянні з тривалістю безвідмовної роботи. У цьому випадку можна вважати, що відновлення відбуваються миттєво і моменти відмов і відновлень збігаються, тоді потік відмов вагона є найпростішим або пуассонівським. Властивості пуассонівського потоку наведені у попередньому розділі.

Аналогічно потоку відмов моменти часу закінчення ремонтних робіт утворюють потік відновлень, який, як правило, також є найпростішим. Як показники надійності об'єктів, що відновлюються, розглядають імовірнісні характеристики потоків відмов і відновлень, а також напрацювання на відмову і час відновлення.

При розгляді кількісних характеристик надійності виробів, що відновлюються, будемо як і раніше припускати, що вони визначаються за статистичними даними, одержаними в результаті випробувань.

Середнє число відмов  $H(t)$  за час  $t$  - це математичне очікування кількості відмов за даний час. За результатами випробувань або спостережень за експлуатацією  $N$  зразків фіксують кількість відмов  $m_i(t)$  і визначають оцінку середньої кількості відмов:

$$H(t) = \frac{1}{N} \sum m_i(t). \quad (5.16)$$

Параметром потоку відмов називається середнє число відмов в одиницю часу:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}. \quad (5.17)$$

Оцінка параметра потоку з експериментальними даними визначається за формулою

$$\omega_i(t) = \frac{1}{N\Delta t} \left[ \sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t) \right], \quad (5.18)$$

де  $\Delta t$  - малий проміжок часу.

Статистична формула показує фізичний зміст параметра потоку відмов – це середнє число відмов об'єкта, що відновлюється, в одиницю часу. Тобто це величина, аналогічна інтенсивності відмов. Однак ці показники принципово відрізняються: інтенсивність відмов визначається, як відношення кількості об'єктів, які відмовили в одиницю часу, до середнього числа виробів, що працюють, причому об'єкти, які відмовили, не розглядаються. При визначенні параметра потоку відмов об'єкти, що відмовили, ремонтуються або замінюються новими, тобто кількість об'єктів, що випробовуються, зберігається постійною протягом усіх випробувань. Проте в період нормальної експлуатації вони чисельно збігаються  $\omega = \lambda$ . Характерний графік потоку відмов має вигляд, поданий на рис. 5.6.

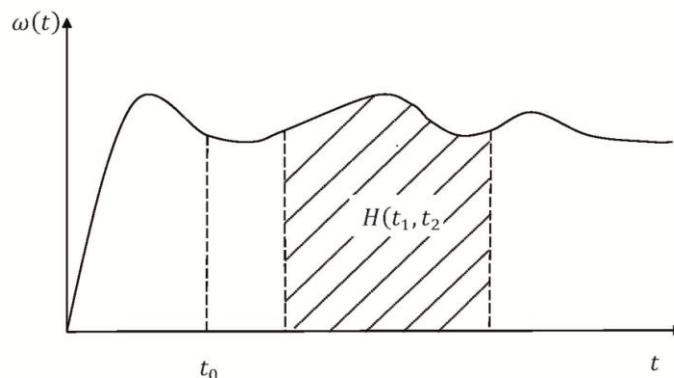


Рис. 5.6. Залежність параметра потоку відмов від часу

Через параметр потоку відмов можливо знайти середню кількість відмов в інтервалі часу:

$$H(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt = \int_0^{t_2} \omega(t) dt - \int_0^{t_1} \omega(t) dt = H(t_2) - H(t_1). \quad (5.19)$$

Після періоду припрацювання, коли  $\omega(t) = \omega$ , середня кількість відмов в інтервалі часу залежить лише від довжини інтервалу

$$H(t) = \omega(t_2 - t_1). \quad (5.20)$$

Напрацювання об'єкта, який відновлюється, складається з напрацювань між відмовами, тому на відміну від об'єктів, що не відновлюються, математичне очікування напрацювання називається напрацюванням на відмову. Воно визначається як відношення середнього значення напрацювання виробу, що відновлюється, між відмовами

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^{n_k} t_i}{n_k}, \quad (5.21)$$

де  $t_i$  - всі відрізки справної роботи виробу між ремонтами.

Розглядаючи відновлюваність (ремонтпридатність) об'єктів, досліджують випадковий потік відновлень і випадковий час відновлення. При цьому умовно вважають, що час роботи об'єкта між відмовами дорівнює нулю, тобто відразу після закінчення відновлення через одну відмову починається відновлення того ж об'єкта через нову відмову. Як одиничні показники відновлення об'єктів розглядають числові характеристики потоку відновлень і часу відновлення:

- параметр потоку відновлень  $\omega_B(t)$ ;
- імовірність відновлення за заданий час  $P_B(t)$ ;
- інтенсивність відновлення  $\mu_B(t)$ ;

- середній час відновлення  $\bar{T}_B$ .

Параметром потоку відновлень називається середнє число відновлень в одиницю часу, тобто за фізичним змістом він аналогічний параметру потоку відмов. За статистичними даними  $\omega_B(t)$  визначається з виразу

$$\omega_B(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{0B} \cdot \Delta t}, \quad (5.22)$$

де  $N_{0B}$  - число об'єктів, що очікують відновлення;  
 $n_B(\Delta t)$  - число об'єктів, відновлених за час  $(t, t + \Delta t)$ .

Імовірність відновлення за заданий час є ймовірністю того, що час відновлення працездатності об'єкта не перевищить заданого часу

$$P_B(t) = P(T_B < t) = F_B(t). \quad (5.23)$$

тобто являє собою інтегральну функцію розподілу часу відновлення об'єкта. Отже, показник  $P_B(t)$  можна виразити через щільність імовірності відновлення

$$P_B(t) = \int_0^t f_B(t) dt. \quad (5.24)$$

Інтенсивність відновлення об'єкта в момент часу  $t$  є умовною щільністю часу відновлення за умови, що відновлені об'єкти на момент  $t$  не розглядаються.

$$\mu_B(t) = \frac{f_B(t)}{P(T_B \geq t)} = \frac{f_B(t)}{1 - F_B(t)}. \quad (5.25)$$

За фізичним змістом інтенсивність відновлення аналогічна інтенсивності відмови об'єктів, що відновлюються, і має розмірність, зворотну розмірності часу.

За статистичними даними про тривалості  $t_{\text{в}i}$  відновлення  $N$  об'єктів оцінка середнього часу відновлення визначається за відомою формулою

$$\bar{T}_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\text{в}i}}{N}. \quad (5.26)$$

При визначенні середнього часу відновлення конкретного об'єкта використовуються дані про значення часу  $t_{\text{в}i}$  його ремонту за  $n$  відмов

$$\bar{T}_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{\text{в}i}}{n}. \quad (5.27)$$

### 5.3. Комплексні показники надійності

Одиничні показники безвідмовності і довговічності вагонів характеризують одну з властивостей, що складають надійність об'єкта, тому характеризують функціонування рухомого складу як би із двох сторін, незалежно один від одного. У результаті зіставлення різних варіантів вагонів за одиничними показниками часто неможливо зробити висновок, який варіант краще. Отже, є необхідність введення узагальнених показників, що характеризують співвідношення різних властивостей. Такі показники характеризують процес експлуатації в цілому, тому їх часто називають експлуатаційними. Як такі показники використовують:

- функцію готовності  $K_{\text{Г}}(t)$ ;
- коефіцієнт готовності  $K_{\text{Г}}$ ;
- коефіцієнт технічного використання  $K_{\text{ТВ}}$ ;
- коефіцієнт оперативної готовності  $K_{\text{ОГ}}$ .

Функцією готовності називається ймовірність того, що об'єкт, який відновлюється, буде працювати безвідмовно в довільний момент часу  $t$  експлуатації, якщо у початковий момент він був працездатний, за винятком періодів планового простою.

Складна подія застати об'єкт в працездатному стані в довільний момент часу  $t$  складається з двох несумісних подій:

- об'єкт в інтервалі часу  $(0, t)$  не відмовляв –  $P(t)$  ; ;
- об'єкт відмовляв і відновлювався, а після останнього відновлення більше не відмовляв

$$K_{\Gamma}(t) = P(t) + \int_0^t P(t - \tau) \cdot \omega_{\text{в}}(\tau) \cdot dt, \quad (5.28)$$

де  $t$  – малий інтервал часу;

$\omega_{\text{в}}(\tau)$  – параметр потоку відновлень.

Після періоду припрацювання об'єкта випадковий час безвідмовної роботи  $T$  і  $T_{\text{в}}$  буде підпорядковуватися показниковому (експоненціальному) закону  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ ;  $\mu_{\text{в}}(t) = \mu = \text{const}$  і функція готовності набуває вигляду

$$K_{\Gamma}(t) = \frac{\mu_{\text{в}}}{\lambda + \mu_{\text{в}}} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu_{\text{в}}} \cdot \exp[-(\lambda + \mu_{\text{в}}) \cdot t]. \quad (5.29)$$

Якщо об'єкт є таким, що не відновлюється в процесі використання, то  $\mu_{\text{в}} = 0$ , тоді перший доданок дорівнює нулю, у другому доданку перший співмножник дорівнює 1 і вираз (5.29) являє собою показниковий закон надійності

$$K_{\Gamma}(t) = P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (5.30)$$

Функція готовності для об'єктів, що відновлюються та не відновлюються, представлена на рис. 5.7.

Порівнюючи графіки, приходимо до висновку, що ймовірність застати об'єкт у працездатному стані за умови його відновлення після відмови більше, ніж для об'єктів, що не відновлюються.

Розглянемо експлуатацію об'єкта на сталому режимі, тобто коли  $t \rightarrow \infty$ , при цьому функція готовності прагне до постійного значення  $K_{\Gamma}$ , який має назву коефіцієнт готовності.

Коефіцієнт готовності оцінює непередбачені зупинки машини, наявність яких свідчить про те, що планові ремонти та заходи з технічного обслуговування не виконали свою роль.

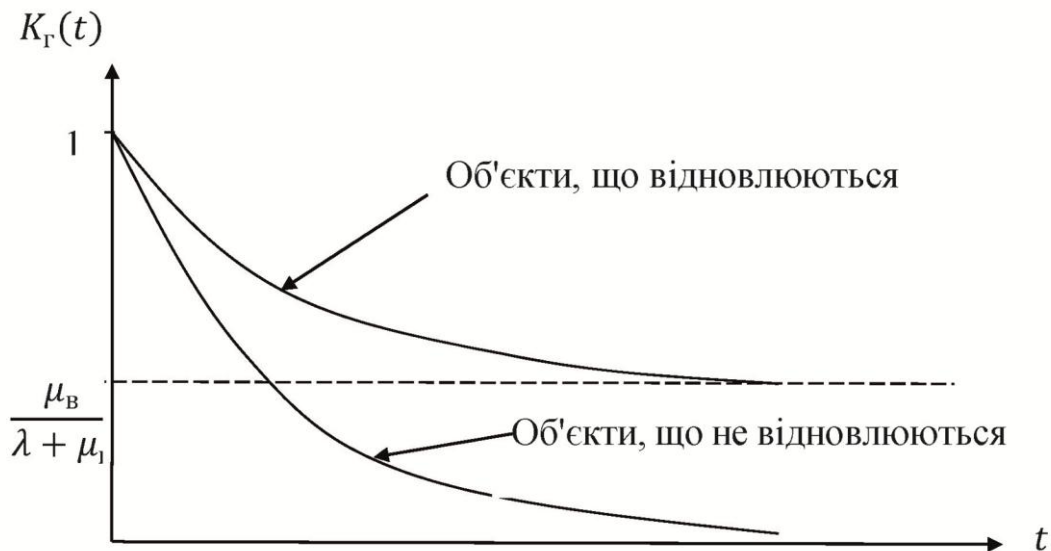


Рис. 5.7. Функція готовності для об'єктів, що відновлюються та не відновлюються

Коефіцієнт готовності дорівнює ймовірності того, що виріб буде дієздатним у будь-який момент часу між плановими ремонтно-профілактичними заходами (час технічного обслуговування, простій вагона через його невикористання тощо).

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t) = \frac{\mu_B}{\lambda + \mu_B} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + T_B} \quad (5.31)$$

де  $\bar{T}$  – сумарний час справної роботи виробу;

$T_B$  – час вимушеного простою.

Коефіцієнт готовності характеризує частку часу безвідмовної роботи від загального часу експлуатації вагона, за винятком часу на планові види ремонту й технічне обслуговування.

За статистичними даними коефіцієнт готовності визначається як співвідношення сумарного часу перебування вагона у працездатному стані до сумарного часу експлуатації за винятком планових простоїв:



$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^U t_i}{\sum_{i=1}^U t_i + \sum_{i=1}^U t_{vi}}. \quad (5.32)$$

Коефіцієнт готовності є важливим експлуатаційним показником, що характеризує безвідмовність та ремонтпридатність, але він не враховує частку часу, яка витрачається на планове технічне обслуговування. Цей недолік враховує коефіцієнт технічного використання.

Коефіцієнт технічного використання – це ймовірність того, що у даний момент часу машина працює, а не ремонтується. Він є відношенням математичного очікування часу дієздатного стану за деякий період експлуатації до суми математичних очікувань часу дієздатного стану та всіх простоїв для ремонтів (відновлення) й технічного обслуговування

$$K_{ТВ} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{T}_B + \bar{T}_{ТО}}. \quad (5.33)$$

де  $\bar{T}_B$  – час на ремонт;

$\bar{T}_{ТО}$  – час на технічне обслуговування.

Зазначені вище показники характеризують імовірність перебування вагона у працездатному стані, але вони не враховують можливість виконувати задані функції після цього моменту. Цей недолік враховує коефіцієнт оперативної готовності.

Коефіцієнт оперативної готовності – це ймовірність події, що виріб, перебуваючи у режимі очікування, виявиться дієздатним у довільний момент часу  $t$  і, починаючи з цього моменту, буде працювати безвідмовно протягом заданого інтервалу часу  $t_p$

$$K_{ог}(t_p) = K_r \cdot P(t_p). \quad (5.34)$$

Під режимом очікування слід розуміти перебування вагона у працездатному стані під повним або полегшеним навантаженням без виконання будь-яких функцій. Необхідність у виконанні

заданої функції виникає у випадковий момент часу, після чого необхідно, щоб вагон безвідмовно працював протягом часу  $t_p$ .

### Питання для самоконтролю

1. Що являє собою ймовірність безвідмовної роботи?
2. Що являє собою інтенсивність відмов?
3. Що являє собою щільність розподілення відмов?
4. Чим характеризується період припрацьовування і чим це зумовлено?
5. Як називається математичне очікування напрацювання до першої відмови?
6. До якого показника надійності належить  $\gamma$ -відсотковий ресурс?
7. З яких операцій складається час відновлення працездатності вагонів після відмов?
8. Що оцінює коефіцієнт готовності?
9. Що являє собою коефіцієнт оперативної готовності?
10. Що являє собою коефіцієнт технічного використання?
11. Які існують показники ремонтпридатності?
12. Які існують показники збереженості?

## 6. МОДЕЛІ ВІДМОВ

### 6.1. Модель раптових відмов

Модель раптових відмов застосовується, коли процес виникнення відмов об'єкта не пов'язаний з часом попередньої роботи, а залежить лише від рівня зовнішніх впливів. Зовнішній вплив оцінюється інтенсивністю відмов, тобто ймовірністю виникнення відмови в одиницю часу за умови, що до цього моменту часу відмова не виникала.

Для раптових відмов інтенсивність у часі постійна, тобто  $\lambda(t) = const$ . Функція розподілу напрацювання до відмови буде мати такий вигляд:

$$F(t) = 1 - \exp^{-\lambda \cdot t}. \quad (6.1)$$

Вона має назву показників, або експоненціальний закон розподілу. Щільність розподілу напрацювання до відмови

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - \exp^{-\lambda \cdot t})}{dt} = -\lambda \cdot \exp^{-\lambda \cdot t}. \quad (6.2)$$

Щільність розподілу та інтенсивності відмов для експоненціального розподілу наведені на рис. 6.1.

Середній час безвідмовної роботи виробу при  $\lambda(t) = const$

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} \exp^{-\lambda \cdot t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.3)$$

Експоненціальним законом розподілу можна апроксимувати час безвідмовної роботи широкого кола об'єктів: особливо відповідальних машин, що експлуатуються після припрацьовування; елементів радіоелектронної апаратури, машин разом з електричним та гідравлічним обладнанням і системами управління.

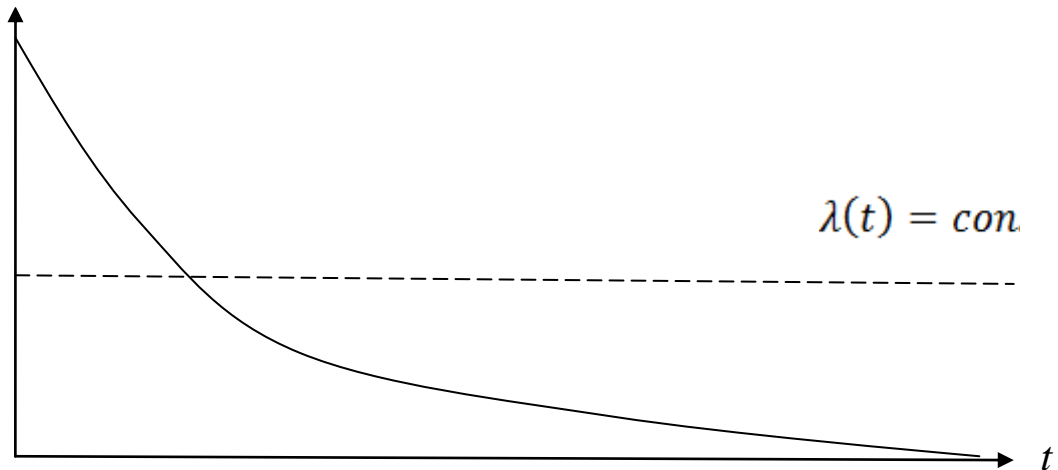


Рис. 6.1. Щільність розподілу та інтенсивність відмов для експоненціального розподілення

Експоненціальний закон розподілу внаслідок своєї простоти і можливості отримання простих рішень широко застосовується в теорії надійності. Усі розрахункові формули у випадку використання цього закону суттєво спрощуються.

Якщо закон розподілу часу безвідмовної роботи відрізняється від експоненціального, то заміна фактичного (невідомого) закону на експоненціальний дає змогу отримати нижню границю для показників надійності, що має велику практичну цінність.

## 6.2. Модель поступових відмов

### 6.2.1. Нормальний закон розподілу

Унаслідок природної неоднорідності матеріалу та режиму навантажень кожний виріб з розглядуваної сукупності має свою реалізацію спрацювання. Уже у початковому стані параметр  $d$  має випадкові відхилення. Зменшуючись по мірі спрацювання, параметри  $d$  виробу досягнуть гранично допустимих значень  $d_{гр}$  за різні відрізки часу  $t_i$ . Щільність розподілу цих відрізків відповідає нормальному закону розподілу:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(t - \bar{T})^2}{2D} \right], \quad (6.4)$$

де  $\bar{T}$  – математичне очікування (середній термін служби);  
 $D$  – дисперсія.

Математичне очікування  $\bar{T}$  визначає на графіку розташування центра петлі, а дисперсія – ширину петлі (рис. 6.2).

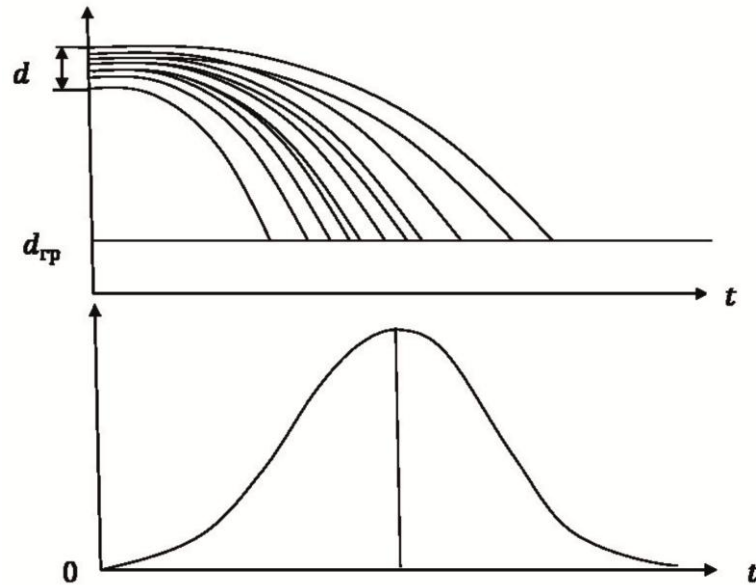


Рис. 6.2. Щільність розподілу для нормального розподілу

Характер петлі визначається значенням асиметрії

$$A = \frac{1}{N \cdot D^{3/2}} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{T})^3. \quad (6.5)$$

При  $A = 0$  – крива симетрична, якщо  $A > 0$  – витягнута її права дільниця спаду, а якщо  $A < 0$  – витягнута ліва дільниця.

Показником гостроти піку є ексцес:

$$E = \frac{1}{N \cdot D^2} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{T})^4. \quad (6.6)$$

Чим більша величина  $E$ , тим крива розподілу гостріша.

Функція розподілу має такий вигляд:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[ -\frac{(t - \bar{T})^2}{2D} \right] dt. \quad (6.7)$$

Нормальний розподіл є найбільш універсальним, зручним і широко застосовується для практичних розрахунків. Розподіл завжди підпорядковується нормальному закону, якщо на зміну випадкової величини мають вплив приблизно рівнозначні фактори. Йому підлягає напрацювання до відмови багатьох деталей, що не відновлюються, допуски на розміри деталей та похибки вимірювань. Для опису часу безвідмовної роботи нормальний закон, як правило, застосовують у період припрацювання. При цьому ймовірність безвідмовної роботи визначається таким чином:

$$P(t) = 1 - \Phi \left( \frac{t - \bar{T}}{\sigma} \right), \quad (6.8)$$

де  $\Phi(\dots)$  – табульований інтеграл Лапласа.

Інтенсивність відмов обчислюється за формулою

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \frac{\exp \left[ -\frac{(t-\bar{T})^2}{2D} \right]}{1 - \Phi \left( \frac{t-\bar{T}}{\sigma} \right)}. \quad (6.9)$$

$\gamma$  -відсотковий ресурс знаходиться таким чином:

$$t_\gamma = \bar{T} + \sigma \frac{1 - \gamma}{\Phi \left( \frac{t-\bar{T}}{\sigma} \right)}. \quad (6.10)$$

### 6.2.2. Логарифмічно-нормальний розподіл

Логарифмічно-нормальний розподіл дещо точніше, ніж нормальний, описує напрацювання до відмови деталей від

утомленості. Тому воно з успіхом застосовується при аналізі поступових відмов унаслідок зменшення міцності та зниження довговічності від утомленості під впливом знакозмінних навантажень.

Логарифмічний нормальний розподіл дуже зручний для випадкових величин, які являють собою добуток значної кількості вихідних випадкових величин, подібно тому, як нормальний розподіл зручний для суми випадкових величин.

Щільність розподілу цих відрізків відповідає нормальному закону розподілу:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_{lnt} \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{lnt - \mu}{\sigma_{lnt}} \right)^2 \right], \quad (6.11)$$

де  $\mu$  – математичне очікування натурального логарифма випадкової величини;

$\sigma_{lnt}$  – середнє квадратичне відхилення натурального логарифма випадкової величини.

За результатами випробувань величини  $\mu$  та  $\sigma_{lnt}$  обчислюються за такими формулами:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N lnt_i. \quad (6.12)$$

$$\sigma_{lnt} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (lnt_i - \mu)^2}. \quad (6.13)$$

Функція розподілу ймовірностей логарифмічно-нормального закону має такий вигляд:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma_{lnt} \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{lnt - \mu}{\sigma_{lnt}} \right)^2 \right] dt. \quad (6.14)$$

Імовірність безвідмовної роботи для логарифмічно-нормального розподілу обчислюється аналогічно, як для нормального розподілу

$$P(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma_{\ln t}}\right). \quad (6.15)$$

### 6.2.3. Усічений нормальний розподіл

Цей розподіл одержують з нормального шляхом обмеження інтервалу випадкової величини. Функція щільності розподілу дуже схожа з відповідною функцією для нормального розподілу, але з урахуванням коефіцієнта пропорційності  $C$ :

$$f(t) = \frac{C}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2D}\right], \quad (6.16)$$

де  $t_0$  – значення випадкової величини, що відповідає максимуму  $f(t)$  і називається мода.

Коефіцієнт  $C$  для розподілу, який обмежений межами зміни напрацювання  $t$  від значення  $a$  до  $b$ , визначається так:

$$\int_a^b f(t) dt = 1 = C \cdot [F(b) - F(a)]. \quad (6.17)$$

Тоді

$$C = \frac{1}{F(b) - F(a)}. \quad (6.18)$$

Поява усіченого нормального розподілу зумовлена тим, що нормальний розподіл не завжди підходить для опису розподілу напрацювання виробів до відмови, оскільки напрацювання не може набувати від'ємні значення.



### 6.3. Сумісна дія раптових і поступових відмов

Цей випадок звичайно виявляється у надто складній формі, коли водночас діють процеси утомленості та спрацювання за наявності випадкових перевантажень. Для математичного опису закономірностей розподілу часу безвідмовної роботи використовується розподіл, який було запропоновано шведським інженером В. Вейбуллом, а теоретично обґрунтовано радянським ученим Б. В. Гнеденком. Цей розподіл досить універсальний і охоплює шляхом варіювання параметрів широкий діапазон випадків зміни ймовірностей.

Функція розподілу напрацювання до відмови має такий вигляд:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right], \quad (6.19)$$

де  $a$  – параметр масштабу;  $b$  – параметр форми.

Інтенсивність відмов обчислюється як

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \cdot \left( \frac{t}{a} \right)^{b-1}. \quad (6.20)$$

Щільність розподілу ймовірності

$$f(t) = \frac{b}{a} \cdot \left( \frac{t}{a} \right)^{b-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (6.21)$$

Середній термін служби

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \cdot \left( \frac{t}{a} \right)^{b-1}. \quad (6.22)$$

де  $\Gamma(\dots)$  – таблична гамма-функція. Вона наведена у математичних довідниках.

На рис. 6.3 та 6.4 наведені функції інтенсивності відмов та щільності розподілу при різних значеннях параметра форми  $b$ .

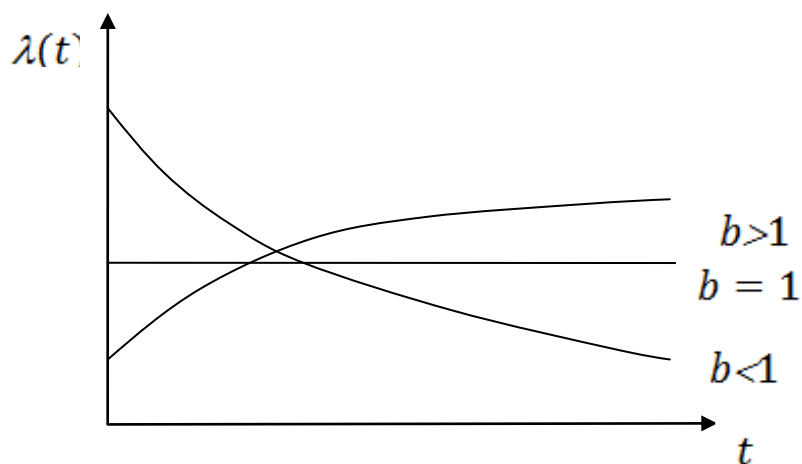


Рис. 6.3. Інтенсивність відмов для розподілу Вейбулла-Гнеденка при різних значеннях параметра форми  $b$

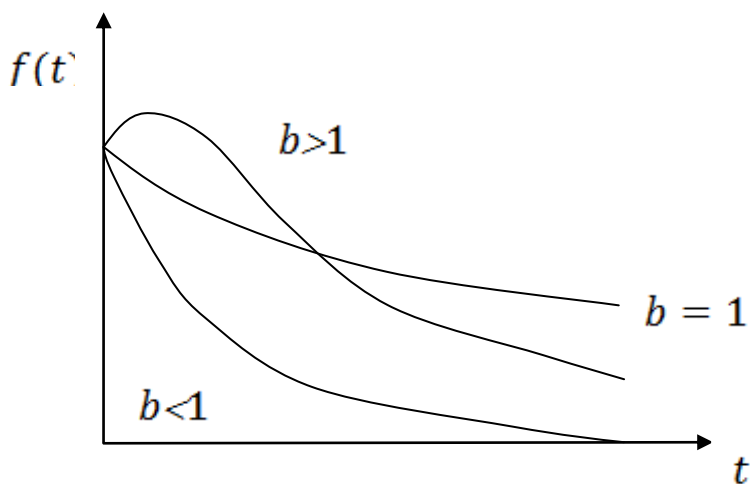


Рис. 6.4. Щільність розподілу для розподілу Вейбулла-Гнеденка при різних значеннях параметра форми  $b$

Очевидно, що при  $b = 1$  розподіл збігається з експоненційним розподілом. При  $b > 1$  інтенсивність монотонно

зростає. При  $b < 1$  інтенсивність монотонно зменшується, що відповідає періоду припрацьовування елементів.

Розподіл Вейбулла-Гнеденка широко використовується для опису напрацювання рухомого складу. Це обумовлено його гнучкістю внаслідок наявності двох параметрів, за допомогою яких можна досягнути більш повної відповідності теоретичного закону розподілу експериментальним даним.

#### 6.4 Гамма-розподіл

Гамма-розподіл, як і розподіл Вейбулла-Гнеденка, визначається двопараметричною щільністю ймовірності

$$f(t) = \frac{t^{b-1}}{a^b \cdot \Gamma(b)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right], \quad t \geq 0; b > 0; a > 0. \quad (6.23)$$

де  $a$  – параметр масштабу;  $b$  – параметр форми.

Якщо  $b$  дорівнює 1, то гамма-розподіл перетворюється у експоненціальний розподіл, а інтенсивність відмов при цьому  $a = \text{const}$ . Функція інтенсивності відмов зменшується при  $b < 1$  і збільшується при  $b > 1$ . При великих  $b$  гамма-розподіл зводиться до нормального розподілу.

Якщо  $b$  дорівнює 1, то гамма-розподіл перетворюється у експоненціальний розподіл, а інтенсивність відмов при цьому  $a = \text{const}$ . Функція інтенсивності відмов зменшується при  $b < 1$  і збільшується при  $b > 1$ . При великих  $b$  гамма-розподіл зводиться до нормального розподілу.

Існують також інші розподіли: Релея, Ст'юдента тощо. Інформація про них наведена в спеціальній літературі

#### Питання для самоконтролю

1. Коли застосовується модель раптових відмов?
2. Для оцінювання напрацювання яких елементів вагонів використовується експоненціальний розподіл?

3. Який розподіл є найбільш універсальним і широко застосовується для практичних розрахунків?
4. Які параметри характеризують нормальний розподіл?
5. Коли застосовується логарифмічно-нормальний розподіл?
6. Коли застосовується усічений нормальний розподіл?
7. Чому розподіл Вейбулла-Гнеденка використовується для опису напрацювання вагонів?
8. Які параметри характеризують розподіл Вейбулла-Гнеденка?
9. За яких умов гама-розподіл зводиться до нормального розподілу?
10. За яких умов розподіл Вейбулла-Гнеденка зводиться до експоненціального розподілу?

## **7. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

### **7.1. Основні вимоги до інформації про надійність вагонів**

Розвиток вагонобудування являє собою безперервний ланцюг конструкцій, які змінюють одна одну. На жаль, не існує "ідеальних" конструкцій вагонів, які б не потребували удосконалення з різних причин. Будь-якій конструкції вагона притаманні ті або інші "вузькі місця", тобто елементи, що найбільш часто відмовляють в експлуатації (шворневий вузол цистерни, з'єднувальна балка восьмивісного вагона, торцеве кріплення буксового вузла з циліндричними роликівими підшипниками тощо). Процес розв'язання цих вузьких місць затягнувся на десятки років. Основна причина настільки тривалого процесу – відсутність фізико-математичного опису процесів навантаження, накопичення й усунення пошкоджень в експлуатації.

Для забезпечення проведення робіт з підвищення якості конструкцій вагонів необхідно забезпечити безперервне надходження інформації про технічний стан вагонів. Наявність експлуатаційної інформації про відмови вагонів, її класифікація та обробка дає змогу достатньо точно встановити причини невисокої якості конструкції та визначити напрями робіт з підвищення її ефективності. Джерелом цієї інформації можуть бути дані реальної експлуатації вагонів. Це завдання спрощується впровадженням сучасних інформаційних технологій, коли на залізницях країн СНД вже впроваджено пономерний централізований облік пробігу та перебування вагонів, що дає змогу отримувати інформацію про відмови вагонів та час міжремонтного пробігу.

Ще одним джерелом інформації є результати стендових або експлуатаційних випробувань вагонів та їх вузлів.

Завданнями збирання та обробки інформації про надійність вагонів є:

- отримання оцінок показників надійності;

- установлення закону розподілу випадкових величин (напрацювання до відмови, середній час відновлення), що характеризують надійність вагонів;

- установлення значущості впливу окремих факторів на показники надійності;

- порівняльна оцінка конструкцій двох або більше типів вагонів.

Обробка експлуатаційної інформації для отримання кількісних показників надійності має дві основні мети:

- перевірка відповідності елементів конструкції вимогам, що до них висуваються;

- здійснення зворотного зв'язку між експлуатацією і виробництвом.

У результаті реалізації тих або інших випробувань на надійність ми отримуємо вибірку – упорядковану в часі послідовність чисел

$$t_1, t_2, t_3, \dots \dots t_n, \quad (7.1)$$

де  $t_i$  – напрацювання до  $i$ -ї події (наприклад до  $i$ -ї відмови).

Тобто ми отримуємо масив даних, кожний елемент з якого є випадковою величиною, що характеризує напрацювання  $i$ -ї деталі вагона до відмови.

Отримана інформація повинна пройти так звану попередню обробку.

Оснoву попередньої обробки становить класифікація порушень дієздатності – встановлення того, які саме властивості вагонів виявляються при тих або інших порушеннях дієздатності. У результаті весь масив інформації ділиться на три групи:

- дані, що характеризують втрати дієздатності через грубі порушення технології виготовлення і норм конструювання;

- дані, що характеризують втрати дієздатності через грубі порушення правил експлуатації вагонів;

- дані, що характеризують втрати дієздатності з інших причин.

Саме останній масив інформації повинен розглядатися як вихідні дані для отримання показників надійності. Перший масив

даних призначений для виробників вагонів (вагонобудівних заводів) для планування заходів з удосконалення конструкції, технології виготовлення та ремонту вагонів. Другий масив даних призначений для використання у відповідних підрозділах Укрзалізниці для забезпечення грамотної експлуатації вагонів.

У процесі обробки потрібно розрізняти дві задачі:

1) оцінка показників надійності є остаточною метою досліджень;

2) показники надійності розглядаються як критерії, відносно яких оптимізуються параметри системи технічного обслуговування або ремонту.

При формуванні вибірки стосовно розв'язування першої задачі не враховуються:

- відмови, що є наслідком інших відмов;
- повторні відмови одних і тих же елементів конструкції, якщо відомо, що вони виникли як результат попереднього низькоякісного ремонту.

При розв'язанні другої задачі враховуються залежні відмови, а також виробничі і конструкційні відмови для тих типів і модифікацій вагонів, виробництво яких уже припинено. Тобто вихідна вибірка формується шляхом додавання даних першого і третього масивів.

Одним з джерел інформації про надійність є натурні огляди вагонів (або їх вузлів) в експлуатації. Як правило, вони проводяться працівниками груп надійності шляхом заповнення карток несправностей. Остання являє собою бланк із запитаннями, на які треба дати готові відповіді (або підкреслити потрібне). Форма карток повинна допускати можливість машинної обробки інформації.

Як правило, картки містять такі запитання:

- вихідні дані вагона: тип і номер вагона, завод-виробник, ремонтне підприємство і дата останнього планового ремонту; підпис особи, що заповнювала картку, і дата заповнення;

- дані про відмову: причина відмови - фактор конструкційного характеру або інше; напрацювання вагона до відмови; зовнішній прояв відмови; умови експлуатації і режиму роботи, що сприяли виникненню відмови; час, витрачений на відновлення дієздатності, фактична трудомісткість відновлення; наслідки відмови і т. п.

Характерною особливістю при експериментальній оцінці показників надійності є підвищена можливість грубих помилок. Як показує практика, такі помилки виникають при формально коректному використанні математичного апарату. Наприклад, велика ймовірність того, що у вибірку потраплять аномальні реалізації – скажімо, як результат помилки при класифікації відмов. Аналітичні методи базуються на довірі до кожного елемента вибірки.

Нехай  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  – напрацювання до відмови вузла вагона. Для стандартизації обчислень зведемо всі дані в інтервал  $[0; 1]$  за допомогою перетворення

$$X_i = \frac{t_i - t_{min}}{t_{max} - t_{min}}, \quad (7.2)$$

де  $t_{max}, t_{min}$  - максимальне і мінімальне значення напрацювання у вибірці. Отже, припускається, що випадкова величина  $X_i$  (напрацювання до відмови) набуває своїх конкретних значень  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) на інтервалі  $[0; 1]$ . Для відокремлення значень  $x_i$ , що різко виділяються, можна використати нерівність Чебишева

$$P\{|x - Mx| \geq \alpha\} \leq \frac{Dx}{\alpha^2}, \quad (7.3)$$

де  $Mx, Dx$  – математичне очікування та дисперсія випадкової величини  $X$ . Обравши  $\alpha = 3\sigma$ , отримаємо

$$P\{|x - Mx| \geq 3\sigma\} \leq \frac{1}{9}. \quad (7.4)$$

Таким чином, з імовірністю більше  $8/9$ , усі значення  $x_i$  випадкової величини лежать в інтервалі  $[Mx - 3\sigma; Mx + 3\sigma]$ . Обчисливши оцінки  $Mx$  і  $\sigma$ , знайдемо цей інтервал та відкинемо всі значення  $x_i$ , що не потрапили до нього, як незадовільні.



## 7.2. Експериментальна перевірка надійності вагонів

При організації робіт з відпрацювання надійності конструкції передбачається, що надійність закладається на стадії науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, забезпечується при серійному виробництві, підтримується і відновлюється при технічному обслуговуванні і ремонті, реалізується при використанні відповідно до вимог нормативної документації.

На етапі експериментальної перевірки надійності пропонуваного виробу потрібно вирішити такі питання:

- як організувати випробування;
- яку інформацію про виріб треба збирати та яким чином;
- як правильно обробити результати випробувань.

При цьому необхідно врахувати можливість виникнення помилок класифікації статистичної інформації про відмови, помилок математичної обробки результатів випробувань, а також урахувати невизначеність результату через малий обсяг статистичної інформації.

Під експериментальною оцінкою показників надійності розуміють:

- виявлення слабких місць об'єкта, що випробовується, і відповідно розроблення заходів щодо підвищення його надійності;
- оцінку досягнутого рівня надійності виробу в цілому;
- оцінку показників надійності комплектувальних елементів (підготовка вихідних даних для подальших розрахункових оцінок);
- контроль відповідності виробу заданим вимогам до надійності;
- нормування ЗІП;
- нормування трудомісткості та вартості обслуговування і ремонту.

З перерахованих завдань безпосередньо з оцінкою показників надійності пов'язані три завдання:

- оцінка показників надійності виробу в цілому;
- оцінка показників надійності комплектувальних елементів;
- контроль відповідності заданим вимогам до надійності.

Причому перші два завдання припускають кількісне вирішення, тобто повинні дати відповідь типу: "Скільки ж є насправді?", а останнє припускає якісне рішення типу: "Так - немає", тобто чи задовольняє виріб певні вимоги, чи ні. Відповідно до цього випробування називаються визначальними, якщо вирішують перші два завдання. Якщо вирішують тільки останнє завдання, то такі випробування називаються контрольними.

Випробування на надійність будь-якого виду містять такі основні етапи:

- 1) планування;
- 2) організація випробувань;
- 3) обробка статистичної інформації.

Планування містить правила відбору зразків, визначення обсягу вибірки, часу випробувань, критеріїв приймання і бракування.

Організація випробувань містить регламентацію таких питань, як порядок і умови випробувань, порядок контролю працездатності і фіксації відмов, форми облікових документів і т.д.

Для різних видів випробувань значення того або іншого етапу й обсяг робіт по кожному етапу різні.

Так, при визначальних випробуваннях на надійність планування зводиться в основному до орієнтовної оцінки обсягу партії і тривалості випробувань виходячи з очікуваної надійності виробу і заданої точності оцінки. Необхідна кількість визначальних випробувань характеризується трьома величинами:

- бажана достовірність оцінки;
- бажана точність оцінки;
- дійсне значення показника надійності виробу.

Оскільки дійсне значення показника надійності перед визначальними випробуваннями невідоме, то для планування випробувань використовують іншу величину - так зване "очікуване" значення показника надійності. Ця величина береться або на підставі попередніх розрахунків, або виходячи з надійності аналогічних виробів, або орієнтуючись на необхідне значення показника надійності.

Природно, що при такому плануванні дійсний обсяг

випробувань може бути і більше, і менше від запланованого, залежно від того, наскільки "очікуване" значення показника близьке до його дійсної величини.

### 7.3. Плани спостережень

Одним з найбільш достовірних джерел для проведення оцінки показників надійності є проведення випробувань або спостереження за вагонами в експлуатації. План спостережень повинен установлювати число об'єктів спостережень, порядок проведення спостережень та критерій їхнього припинення.

Найчастіше використовуються такі плани спостережень:

$[NUT]$ ,  $[NUr]$ ,  $[NRr]$ ,  $[NRT]$ ,

де  $N$  – число об'єктів спостереження (наприклад кількість вагонів у контрольній партії);

$U$  – позначення планів, коли вироби, що відмовили, новими (або відремонтованими) не замінюються;

$T$  – установлене напрацювання або час проведення випробувань;

$R$  – позначення планів, коли вироби, що відмовили, замінюються новими (або відремонтованими);

$r$  – кількість відмов або граничних станів, до виникнення яких проводяться спостереження.

У вагонному господарстві найчастіше для оцінки надійності використовують пробіг  $L$ , км. Таким чином, плани спостережень за надійністю можуть бути перетворені

$[NUL]$ ,  $[NUr]$ ,  $[NRr]$ ,  $[NRL]$ .

Окремим випадком плану спостережень  $[NUT]$  є план  $[NUN]$  (так званий повний план). Він означає, щоб під спостереження взята контрольна партія з  $N$  вагонів (або їх вузлів) та випробування проводяться до того моменту, коли вони всі відмовлять. Таким чином, при повному плані оцінюється напрацювання до першої відмови об'єктів, що не ремонтуються.

Для об'єктів, що не ремонтуються, при цьому плані визначаються напрацювання до першої відмови. У цьому випадку  $L$  - установлений пробіг до закінчення випробувань. Фактично - це пробіг до деповського або капітального ремонту.

Модель експлуатації при плані  $[NUN]$  наведена на рис. 7.1.

При плані  $[NUL]$  виконується спостереження технічного стану  $N$  об'єктів протягом пробігу  $L_p$  (рис. 7.2).

Випробування припиняються, коли напрацювання об'єктів, що не відмовили, досягло заздалегідь обумовленого пробігу  $L_p$ .

Перевагою цього плану спостережень є менший період спостережень, оскільки не має необхідності очікувати відмови всіх  $N$  виробів. З цієї причини цей план дуже широко застосовується в практиці визначення показників надійності, особливо за умови, що кількість об'єктів  $N$  велика, а ймовірність відмови незначна. План  $[NUL]$  може бути використаний як для об'єктів, що не ремонтуються, так і для об'єктів, що проходять відновлення. Відмінність полягає в тому, що об'єкт, який був відремонтований після першої відмови, у подальшому виключається із спостережень.

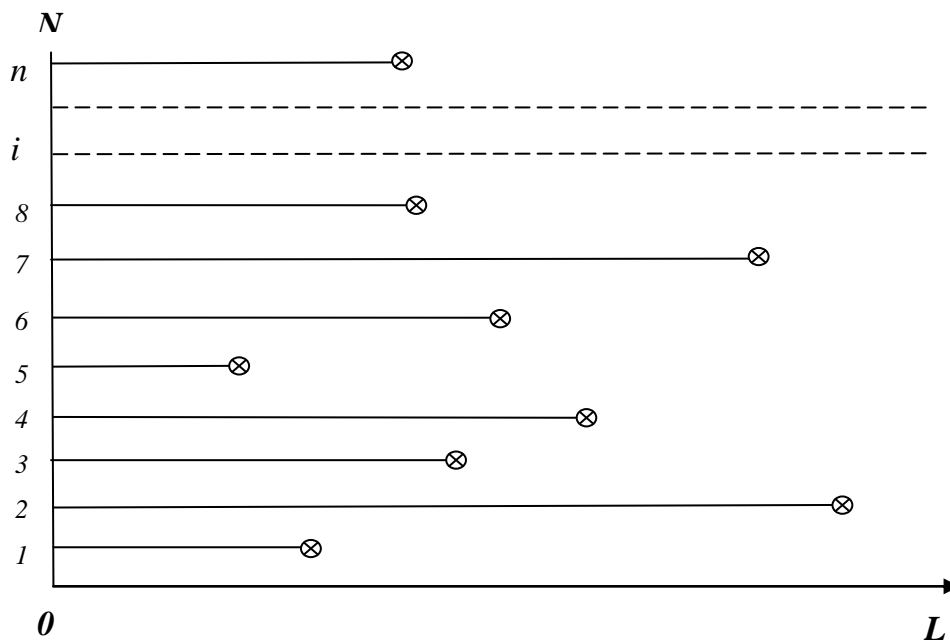


Рис. 7.1. Схема плану спостережень  $[NUN]$

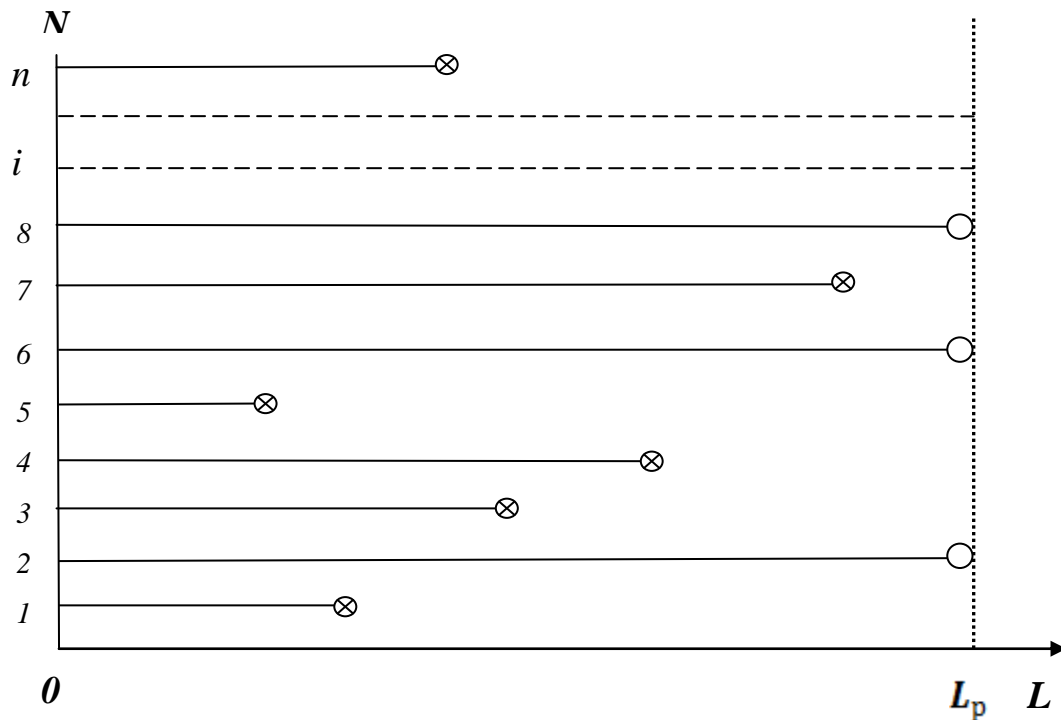


Рис. 7.2. Схема плану спостережень [NUL]

Також необхідно зазначити, що план [NUN] вимагає, щоб випробування проводилися досить тривалий час, що може бути неприйнятним з технічних або економічних причин.

У плані [NUR] під наглядом перебуває  $N$  виробів, об'єкти, що відмовили, новими (або відремонтованими) не замінюються, спостереження тривають до накопичення  $r$  відмов (або граничних станів). Схема цього плану спостережень наведена на рис. 7.3.

Спостереження припиняються після того, як відмовив  $r$ -й об'єкт.

Відмінністю плану [NRr] є те, що об'єкти спостережень після відмов одразу ж замінюються новими (або ремонтуються за короткий час). Спостереження проводяться до моменту отримання  $r$  відмов.

Стосовно критеріїв припинення спостережень, то вони можуть бути припинені після закінчення заданого часу  $T$  або у випадку, коли число виробів, що відмовили, досягне заздалегідь обумовленої кількості  $r$  (або до відмови всіх елементів  $N$ ).

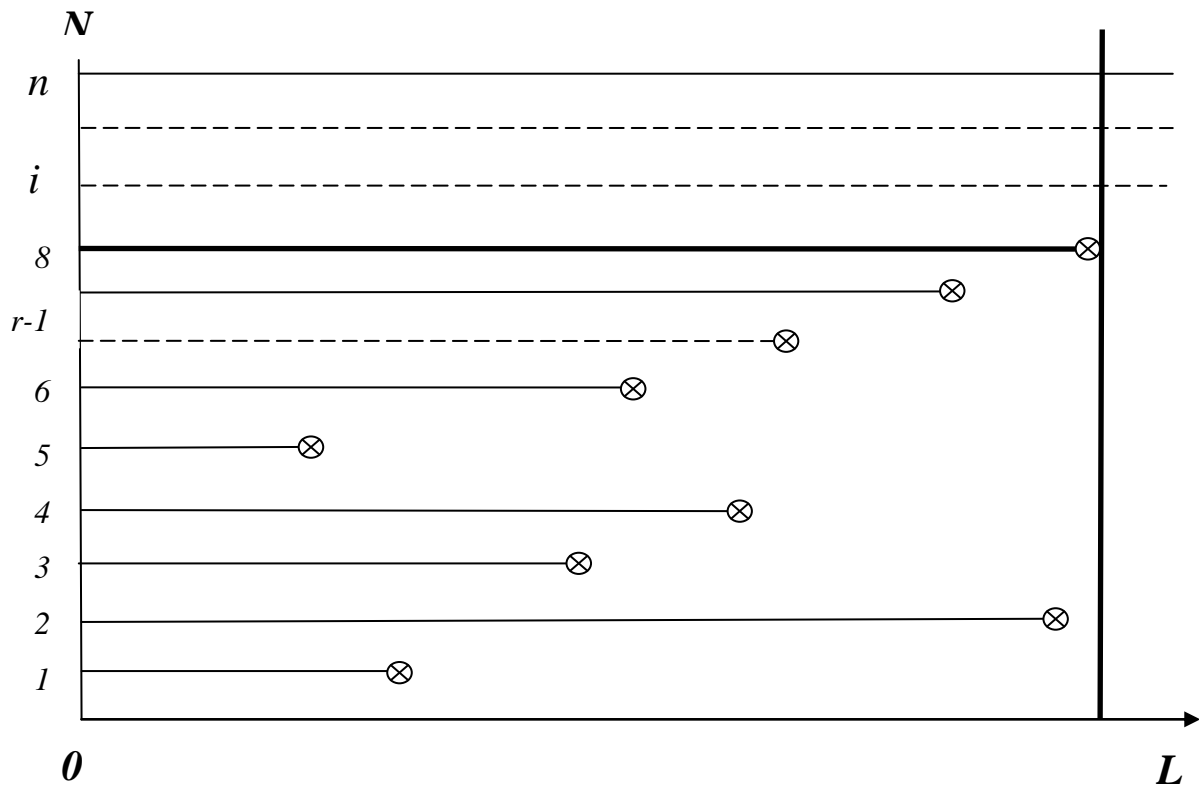


Рис. 7.3. Схема плану спостережень  $[Nur]$

Також можуть використовуватися плани типу  $[NU(r, T)]$ ,  $[NR(r, T)]$ . Тобто спостереження проводяться до моменту  $t_r$  появи відмови, якщо  $t_r < T$ , або до моменту  $T$ , якщо  $t_r > T$ .

Універсальність та наочність графічних методів дає змогу виключити грубі помилки. Тому стосовно обробки результатів випробувань в умовах малого обсягу статистичної інформації та лише орієнтовних відомостей про вид функції розподілу випадкової величини, що досліджується, графічні методи набувають особливого значення.

#### 7.4. Статистичні методи обробки експериментальних даних

Основним завданням математичної статистики є розроблення методів отримання науково обґрунтованих висновків про масові явища та процеси з аналізу даних спостережень або експериментів, в т.ч. виробничих експериментів. Ці висновки належать не до окремих

випробувань, а є твердженнями про загальні ймовірнісні характеристики досліджуваного процесу, тобто про ймовірності, закони розподілу, математичні очікування та дисперсії випадкових величин, що аналізуються. Об'єктивними ці дані будуть тільки в тому випадку, якщо вони розраховані на основі спостережень за експлуатацією об'єктів, що становлять генеральну сукупність. Генеральну сукупність становить повна множина однотипних об'єктів, які мають певні властивості. Прикладом генеральної сукупності можуть служити, наприклад, усі візки вантажних вагонів моделі 18-100, що експлуатуються на мережі залізниць.

Однак у більшості випадків неможливо отримати інформацію про всі елементи множини, що становить генеральну сукупність. Тому зазвичай використовується випадкова вибірка. Маючи певну конкретну (часто обмежену за обсягом) інформацію, наприклад про напрацювання до відмови групи технічних об'єктів, можна на основі використання статистичних методів зробити більш загальні, достатньо 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 та оцінки відображають випадковий склад об'єктів групи і тому є наближеними. Застосовуючи методи математичної статистики, наприклад вибірковий метод, можна використовувати отриману інформацію і на підставі дослідження вибіркової сукупності отримати досить достовірні оцінки кількісних показників, зі вказівкою при цьому ступеня вірогідності. У цьому і полягає наукова цінність статистичних методів і їх практична значущість.

Поняття про згаданий вибірковий метод, 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 випробовується не вся сукупність певних об'єктів, тобто генеральна сукупність, а тільки деяка її частина, так звана вибірка сукупність (або вибірка), що складається з елементів, відібраних ненавмисно,

випадково. Вибірка повинна бути репрезентативною (представницькою), тобто пропорції її об'єктів різних підвидів у середньому повинні відповідати пропорціям, що наявні в генеральній сукупності.

Параметри, що повністю характеризують генеральну сукупність, можуть бути отримані тільки на підставі використання повністю всіх даних про неї. Якщо ж використовуються дані випадкової вибірки, то виходять статистичні оцінки параметрів генеральної сукупності.

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

Маючи інформацію про характеристики вибірки випадкових величин, можна побудувати емпіричну функцію розподілу, гістограму і розрахувати відповідні оцінки емпіричного розподілу.

Нехай  $x$  - деяка точка осі  $X$ ; позначимо через  $n_x$  кількість вибірових значень, розташованих ліворуч  $x$  на тій же осі. Отже, відношення  $n_x/n$  показує частість появи у вибірці значень випадкової величини  $X$ , менших, ніж  $x$ . Ця частість, очевидно, є функцією  $x$ , позначається  $W_n(x)$  і називається емпіричною функцією розподілу.

$$W_n(x) = \frac{n_x}{n} \quad (7.5)$$

Таким чином, функція (7.5) є оцінкою ймовірності нерівності  $X < x$ , тобто теоретичної функції розподілу



$F(x) = P(X < x)$  випадкової величини  $X$  або, іншими словами, функції розподілу генеральної сукупності.

Якщо сукупність  $n$  значень випадкової величини розташовується в порядку зростання  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ , то виходить варіаційний ряд  $n$  реалізацій випадкової величини. Розділивши розкид 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  $F(x)$ , які відповідають кінцям кожного інтервалу розбиття, характеризують сумарну величину частот, накопичених на всіх попередніх інтервалах, включаючи розглянутий.

Гістограма є графічним поданням статистичної частоти (емпіричної ймовірності) інтервального варіаційного ряду. Для побудови гістограми необхідно розбити дійсну вісь на кінцеву кількість числа проміжків, що межують один з одним  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_i$ . Після цього підраховують число  $m_i$  вибіркового значень, що лежать усередині  $\Delta_i$ . Ці числа називають груповими частотами. Далі над  $\Delta_i$  рисують прямокутники висотою  $m_i/n$ . Східчастий графік, що виникає, є гістограмою (рис. 7.4).

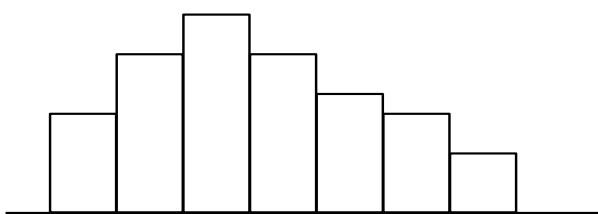


Рис. 7.4. Побудова гістограми

Побудована таким чином гістограма називається гістограмою відносних частот. Площа гістограми, зосереджена у всіх інтервалах, дорівнює сумі відносних частот розбиття, тобто одиниці.

На підставі гістограми можна сформулювати гіпотезу про характер функції розподілу.

Для побудови емпіричної функції розподілу в залежності від характеру вибірки (цензурована, нецензурована) використовують спеціальні методи, наприклад метод Джонсона або метод Фішбейна, про які більш докладно викладено у спеціальній літературі.

### 7.5. Основні методи визначення параметрів функції розподілення

На відміну від фактичних числових характеристик (параметрів) генеральної сукупності отримані вибіркові статистичні оцінки позначаються верхньою горизонтальною рисою, наприклад,  $\bar{F}(x)$ ,  $\bar{f}(x)$ ,  $\bar{x}$ ,  $\bar{S}$  тощо. Якщо певна статистична оцінка  $\bar{\varphi}$  отримана на підставі результатів випробувань або спостережень  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , але не залежить від невідомих параметрів, то вона називається точковою. Незміщеною оцінкою параметра  $\varphi$  буде така оцінка  $\bar{\varphi}$ , у якої математичне очікування збігається з параметром незалежно від кількості випробувань або спостережень, тобто при будь-якому  $n$

$$M[\bar{\varphi}(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \varphi. \quad (7.6)$$

Якщо така збіжність існує за умови  $n \rightarrow \infty$ , то оцінка буде *асимптотично незміщеною*.

*Обґрунтована оцінка параметра  $\bar{\varphi}$*  – це така оцінка, яка сходиться за ймовірністю з параметром  $\varphi$ , який оцінюється, при  $n \rightarrow \infty$ , тобто

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{|\varphi - \bar{\varphi}| > \varepsilon\} = 0, \quad (7.7)$$

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

Оцінка  $\bar{\varphi}$  вважається ефективною відносно параметра  $\varphi$ , якщо значення її дисперсії будуть мінімальними з усіх можливих значень дисперсій оцінки  $\bar{\varphi}$  відносно параметра  $\varphi$ . Оцінка  $\bar{\varphi}_1$  вважається більш ефективною, ніж оцінка  $\bar{\varphi}_2$  за умови

$$M|(\bar{\varphi}_1 - \varphi)^2| < M|(\bar{\varphi}_2 - \varphi)^2|. \quad (7.8)$$

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

Для оцінки відповідних параметрів функції розподілу використовується ряд методів математичної статистики: метод моментів, метод квантилів, метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності.

Найчастіше використовується метод найменших квадратів.

Він базується на тому, що умовою найкращого середньоквадратичного наближення є мінімізація суми середньоквадратичного відхилення експериментальних даних від теоретичної кривої

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \rightarrow \min. \quad (7.9)$$

Одним з найбільш ефективних методів є метод максимальної правдоподібності. При його застосуванні оцінки параметрів  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$  функції розподілу  $F(t)$  визначають шляхом розв'язання системи  $k$  рівнянь

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi_i} = 0, \quad (i = \overline{1, k}). \quad (7.10)$$

У цьому рівнянні  $L$  – це функція правдоподібності, яка дорівнює

$$\sum_{i=1}^n \ln f(t), \quad (7.11)$$

де  $f(t)$  – похідна від функції розподілу;

$n$  – кількість елементів у вибірці.

Припустимо, що функція розподілу напрацювання до відмови згідно з (6.19) має такий вигляд:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right]$$

Як відомо, розподіл Вейбулла має два параметри: "a" - параметр масштабу і "b" - параметр форми, які необхідно оцінити за допомогою даних експлуатаційних спостережень. Функція правдоподібності буде мати такий вигляд:

$$L = \sum_{i=1}^m \ln f_{\tau_i}(t) + \sum_{j=1}^s \ln [1 - F_{t_j}(t)], \quad (7.12)$$

де  $f_{\tau_i}(t) = \frac{b}{a} \cdot \left( \frac{t}{a} \right)^{b-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{t}{a} \right)^b \right]$  - щільність розподілу напрацювання до відмови;

$F_{t_j}(t)$  - функція розподілу безвідмовного напрацювання.

Тоді функція правдоподібності буде мати вигляд

$$L = m \cdot \ln b - mb \cdot \ln a + (b - 1) \cdot \sum_{i=1}^m \ln \tau_i - \left( \sum_{i=1}^m \tau_i^b + \sum_{j=1}^s t_j^b \right), \quad (7.13)$$

де  $\tau_i$  - ряд напрацювань, що завершилися відмовами;

$t_j^b$  - ряд безвідмовних напрацювань.

Обчислимо похідні за параметрами і прирівняємо їх до нуля

$$\frac{\partial L}{\partial a} = - \frac{m \cdot b}{a} + \frac{b}{a^{b+1}} \left( \sum_{i=1}^m \tau_i^b + \sum_{j=1}^s t_j^b \right) = 0 \quad (7.14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \frac{m}{b} - m \cdot \ln a + \sum_{i=1}^m \tau_i^b + a^{-b} \cdot \ln a \cdot \left( \sum_{i=1}^m \tau_i^b + \sum_{j=1}^s t_j^b \right) - a^{-b} \cdot \left( \sum_{i=1}^m \tau_i^b \cdot \ln \tau_i + \sum_{j=1}^s t_j^b \cdot \ln t_j \right). \quad (7.15)$$

Тоді з рівняння (7.14) отримуємо

$$\hat{a} = \frac{(\sum_{i=1}^m \tau_i^b + \sum_j^s t_j^b)^{\frac{1}{b}}}{m} \quad (7.16)$$

де  $\hat{a}$  – оцінка параметра  $a$ .

Якщо підставити одержане значення  $a$  у рівняння (7.15), то одержимо відповідне значення  $b$ .

Необхідно також зазначити, що отримані оцінки є точковими. Стосовно високонадійних вузлів ефективність таких оцінок недостатньо висока, тому використовуються інтервальні оцінки.

Одним з попередніх методів установлення характеру функції розподілу є графічний метод. Для його використання необхідний імовірний графік для кожного розподілу. На ньому наносяться відповідні точки. Якщо вони добре лягають на пряму лінію, то явних протиріч для використання даного розподілу немає і у першому наближенні можна прийняти даний розподілення. Цей метод рекомендується використовувати, якщо апіорі невідомий вигляд функції розподілу.

Після визначення параметрів функції розподілу необхідно виконати перевірку теоретичного розподілу з експериментальними даними за допомогою критеріїв узгодження

### **Питання для самоконтролю:**

1. Які завдання вирішує збір та обробка інформації про надійність вагонів?
2. Які питання необхідно вирішити на етапі експериментальної перевірки надійності вагонів?
3. Які основні етапи містять випробування на надійність вагона?
4. Що означає план випробувань  $[NUT]$ ?
5. У чому полягають недоліки плану  $[NUN]$ ?
6. Який план випробувань доцільно обирати при підконтрольній експлуатації вагонів?

7. Який метод найчастіше використовується для оцінки параметрів функції розподілу?
8. Як обирається кількість розрядів гістограми?
9. Що означає, що оцінка параметра певної функції розподілу ефективна?
10. Який параметр найчастіше використовують у вагонному господарстві для оцінки надійності?

## 8. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ

### 8.1. Методи забезпечення надійності на етапі проектування

Вивчення методів забезпечення надійності дає змогу виявити фактори, котрі визначають надійність рухомого складу, а отже, раціонально обґрунтувати заходи щодо підвищення надійності. Методи підвищення надійності за змістом діляться на організаційні й технічні і використовуються на етапах проектування, виробництва і застосування за призначенням (при експлуатації). На кожному з цих етапів діють свої специфічні фактори, що знижують надійність, тому доцільно розглянути кожен етап окремо.

Основними методами забезпечення надійності на етапі проектування є нижченаведені.

Надійність будь-якої системи обернено пропорційна кількості комплекту елементів, тому спрощення схеми, пов'язане з числом елементів, є потужним засобом підвищення надійності. Наприклад, використання інтегральних мікросхем у системах управління і контролю дало змогу різко підвищити їх надійність. Застосування регуляторів односторонньої дії підвищило надійність роботи автогальм, так як вони виконані простіше і працюють тільки на скорочення довжини важільної передачі. Проте завжди є нижня межа для числа елементів, оскільки вагони, крім надійності, повинні мати й інші властивості: вантажопідйомність, здатність автоматично з'єднуватися в єдиний склад, мати автогальма тощо.

Якість проектування багато в чому визначається раціональним вибором конструктивно-компонувальної схеми, схеми навантаження, обґрунтуванням вихідних даних та методик розрахунку. Найбільшою складністю є розрахунки елементів вагона на міцність при дії знакозмінних динамічних навантажень, а також розрахунки деталей на зношування. У зв'язку з цим разом з аналітичними методами розрахунку при проектуванні рухомого складу широко використовуються експериментальні дослідження і моделювання на аналогових і цифрових обчислювальних машинах.

Експлуатаційна надійність багато в чому визначається раціональним вибором конструкційних матеріалів та лакофарбових покриттів, які мають певні властивості.

Застосування для виготовлення кузовів вагонів замість сталей без легуючих елементів хромонікелевих або безнікелевих нержавіючих сталей, а також композиційних матеріалів, дає змогу збільшити термін їх експлуатації до 30 років і більше.

Однією з основних причин відмов елементів вагонів є тертя і спрацювання деталей. Причому знос деталей відрізняється при терті ковзання і терті кочення, а також у залежності від здійснення сухого, граничного, напіврідинного або рідинного тертя. У зв'язку з цим до вибору матеріалів ставляться різні вимоги. Для підшипників кочення використовуються високоякісні леговані підшипникові сталі. Для забезпечення надійності деталей тертя, коли їх герметизація неможлива або недоцільна, застосовують матеріали з полімерів, кераміки або металокераміки, які мають можливість самозмащування. Прикладами таких деталей можуть бути шарнірні з'єднання гальмівної важільної передачі і гальмові башмаки.

Іншою причиною відмов елементів вагонів є їх руйнування від утомленості. Для елементів, які зазнають руйнування від утомленості, необхідно застосовувати матеріали з високими межами міцності при відповідній пружності, що досягається введенням у матеріали легувальних домішок.

Велике значення для забезпечення надійної роботи тертьових деталей має вибір мастильних матеріалів. Низька якість мастил і їх забруднення призводять до інтенсивного зношування деталей. Якщо ж застосовувати спеціальні мастильні матеріали, можливе істотне зниження швидкості спрацювання, а використання явища вибірного перенесення при терті здатне взагалі зупинити знос деталей. З цією метою в мастило вводять спеціальні присадки. Вони утворюють на тертьових поверхнях найтонші плівки захисту від фізичного зносу.

Технологія виготовлення заготовок і деталей багато в чому визначає показники їх надійності. Руйнування деталі під дією змінних навантажень, як правило, починається біля якого-небудь концентратора напружень або на межі з різними характеристиками міцності і плинності в структурі металу. На міцність від утомленості також впливають характеристики напруженого стану деталей біля поверхні. Отже, для зниження



місцевих напружень конструктивні матеріали повинні бути однорідними, суцільними та мати дрібнозернисту структуру.

Крім того, необхідно забезпечити плавні переходи в елементах деталі та відсутність внутрішніх і зовнішніх дефектів. Наприклад, при виготовленні деталей литтям можлива поява внутрішніх раковин, шлакових включень, поверхневих дефектів, концентраторів напружень тощо.

Поверхнева обробка і зміцнення деталей дає змогу змінювати фізико-хімічні властивості матеріалів, що істотно підвищить надійність деталей. Велике поширення отримало загартування струмами високої частоти, що дає змогу підвищити зносостійкість приблизно у два рази. Хіміко-термічні методи обробки, які насичують поверхню деталі (цементування, азотування, фосфатування, хромування та ін.) істотно підвищують не лише зносостійкість, але й антикорозійні властивості деталей. Зміцнення наклепом підвищує твердість матеріалу та межу міцності, що не тільки знижує швидкість спрацювання, але і збільшує опір руйнування від утомленості деталей. Це пояснюється зменшенням впливу структурних неоднорідностей і ліквідацією зовнішніх дефектів. Наприклад, таке зміцнення осей підвищило їх довговічність більш ніж у два рази.

Одним зі шляхів підвищення надійності є підбір стандартних елементів з високими показниками надійності. Цей шлях є очевидним, але у нього є свої особливості, які пов'язані з необхідністю задовольняти інші вимоги – економічні, естетичні, екологічні тощо.

З іншого боку, чим надійніші елементи, тим вони дорожчі, тому необхідний оптимальний підбір виходячи з характеристик вартості і надійності.

Велике значення для підвищення надійності має забезпечення полегшених механічних, електричних і теплових режимів роботи.

На надійність роботи виробів впливає також захист апаратури управління і контролю від ударів, вібрації та інших несприятливих факторів. Основними засобами захисту є встановлення амортизаторів та віброізолювальних прокладок, виготовлення приладів у корпусах, які надають захист від ударів

та вібрацій, а також заливання монтажних схем смолами для утворення більш жорсткої конструкції. Але в цьому випадку необхідно дуже обережно підходити до вибору теплового режиму роботи.

Ще одним з напрямків підвищення надійності є використання блочних схем апаратури управління з максимальним використанням уніфікованих вузлів. Уніфікація схем дає змогу використовувати модульні та мікромодульні конструкції, які мають високу міцність при малих розмірах, а також автоматизувати виробництво як окремих блоків, так і систем у цілому. Це дає змогу суттєво підвищити надійність, оскільки при цьому забезпечується чистота і точність виробництва. Важливе значення в цьому випадку має можливість полегшити технічне обслуговування та ремонт виробів за рахунок скорочення часу виявлення та усунення відмови.

## **8.2. Методи підвищення надійності на етапі виробництва**

До методів підвищення надійності рухомого складу в процесі виробництва належать:

- організація вхідного контролю комплектувальних елементів і матеріалів;
- застосування більш досконалих технологій виготовлення і складання;
- автоматизація виробництва;
- удосконалення системи контролю якості та надійності рухомого складу;
- обкатка нового рухомого складу.

Вхідний контроль комплектувальних елементів і матеріалів повинен супроводжуватися методами руйнівного та неруйнівного контролю. Такий контроль дає змогу виявити невідповідність матеріалів необхідному хімічному складу, заданій структурі, механічним і фізичним властивостям, а також виявить раковини, тріщини, неметалеві включення в заготовках і деталях.

Для проведення неруйнівного контролю деталей рухомого складу найбільше поширення отримали такі методи дефектоскопії:

- дзеркально-тіньовий;
- ехометод;
- магнітопорошковий;
- ферозондовий;
- вихорострумний;
- акустичний;
- ультразвуковий;
- тепловий;
- звуковий;
- методи просвічування рентгенівськими і  $\gamma$ - променями.

Проте, яким би досконалим був метод будь-якого виду неруйнівного контролю, він не забезпечує повною мірою розв'язання задачі виявлення дефектів будь-якого типу або виду. Тому при контролі відповідальних деталей рухомого складу для більшої повноти і глибини контролю застосовують систему неруйнівного контролю, як сукупність одного або декількох методів (і використану за певною програмою для оцінки якості об'єкта контролю). Наприклад, осі вагонів контролюють акустичним, дзеркально-тіньовим, магнітопорошковим, ехометадами.

При проведенні руйнівних методів контролю використовуються спеціальні машини для дослідження характеристик матеріалів: меж міцності, повзучості, плинності тощо при статичних і динамічних навантаженнях. Крім того, випробування проводяться на крутіння, вигин, розтягнення, а також на витривалість і довговічність різних вузлів рухомого складу.

Застосування більш досконалих технологій виготовлення обробки деталей тісно пов'язане з новітніми досягненнями науки і техніки, з виникненням і розвитком мікропроцесорної техніки і роботів.

Значне підвищення надійності деталей і вузлів рухомого складу досягається механізацією й автоматизацією виробництва, застосуванням верстатів з числовим програмним управлінням, гнучких виробничих модулів, роботизованих виробничих комплексів. При цьому досягається стабільно висока якість деталей, що виготовляються, суворе дотримання геометричних розмірів, шорсткості і точності поверхні.

Наприклад, найбільш характерними причинами відмов гідравлічних гасителів коливачів є незадовільна технологія виготовлення штоків, що не забезпечує необхідної твердості й шорсткості поверхні. Таке становище стало результатом відсутності спеціальних високоточних верстатів з числовим програмним управлінням і сучасного устаткування для гальванічних покриттів.

При організації виробництва головним є якість контролю - вхідний контроль елементів, поточний контроль продукції і вихідний контроль. Своєчасне виявлення відхилень у технології виробництва дає змогу регулювати процеси виробництва.

Однак навіть найсучасніші методи контролю не здатні виявити всі дефекти виробництва, а інколи це не вигідно економічно. У таких випадках більш раціональним шляхом забезпечення надійності є обкатка рухомого складу, так як у початковий період експлуатації виявляють найбільшу кількість прихованих дефектів. Період припрацювання рухомого складу доцільно проводити в заводських умовах або на спеціальному полігоні заводу-виробника з таких причин: у період припрацювання виявляються найбільш слабкі елементи, конструктивні помилки, відхилення або недоліки технологій виробництва, усунення яких приводить до зростання надійності. Крім того, у заводських умовах або на спеціальному полігоні заводу-виробника можливе проведення обкатки не тільки в умовах, близьких до експлуатаційних, але й прискорені випробування в тяжких умовах роботи. При цьому, звичайно, зростає вартість виробництва, але це приводить до зниження витрат на усунення дефектів у період експлуатації.

### **8.3. Забезпечення надійності в процесі експлуатації**

Необхідна надійність рухомого складу закладається в процесі проектування і виробництва. Основне завдання експлуатації - підтримка надійності рухомого складу на досягнутому рівні шляхом застосування контролю, технічного обслуговування і всіх видів ремонту.

Основними заходами, що забезпечують безвідмовну роботу рухомого складу, є:

- створення ефективної системи експлуатації, системи збору й обробки інформації про функціонування рухомого складу;
- своєчасна заміна комплектувальних елементів на основі прогнозування відмов;
- якісне проведення технічного обслуговування і всіх видів ремонту;
- дотримання вимог конструкторської й експлуатаційної документації;
- підготовка і підвищення кваліфікації ремонтно-експлуатаційного персоналу;
- удосконалення технологій проведення всіх видів технічного обслуговування та ремонтів.

Під системою експлуатації розуміють сукупність методів, засобів і документів, що регламентують технічну експлуатацію рухомого складу. Така система повинна розроблятися одночасно зі створенням нових типів рухомого складу. При цьому формується структура і функції відповідних підсистем (вагоноремонтні заводи, депо, ПТО і т. д.), створюється комплект організаційно-технічної й експлуатаційної документації. Досвід експлуатації показав, що ефективними є централізовані системи експлуатації, що мають кілька рівнів. Такі системи зменшують витрати на експлуатацію і на засоби обслуговування, збільшують експлуатаційні показники надійності рухомого складу.

Збір і обробка статистичних даних про відмови й напрацювання деталей і вузлів рухомого складу повинні проводитися для установлення взаємозв'язків технологій виготовлення, методів обслуговування і ремонту, умов і режимів експлуатації з характеристиками надійності. Основними вимогами до накопичення інформації є забезпечення достовірності отриманої інформації та повнота опису. Для цього необхідно створити інформаційну систему і систему кодування інформації з експлуатації рухомого складу. Зібрана статистична інформація дає змогу обґрунтувати запаси деталей, розробити оптимальні режими експлуатації, контролю, оглядів і ремонтів рухомого складу.

Прогнозування відмов елементів можливо здійснити розрахунковим шляхом на основі параметричної моделі або експериментальним виявленням елементів, характеристики яких

близькі до гранично допустимих. При цьому необхідно визначити термін служби деталей за граничним зношуванням або граничним станом і встановити терміни заміни цих деталей під час проведення обслуговування або ремонту.

Забезпечення надійності рухомого складу великою мірою залежить від якості і повноти технічного обслуговування вагонів. При проведенні технічного обслуговування можуть бути покращені низькі показники надійності, що були закладені при проектуванні і виготовленні, але показники надійності можуть бути також значно погіршені за рахунок неякісного обслуговування. Якщо роботи з технічного обслуговування проводяться висококваліфікованим персоналом, який має спеціалізований інструмент і технологічні пристосування, то різко знижується потік експлуатаційних відмов. З іншого боку, навіть при наявності точних і досконалих приладів недбале ставлення виконавців робіт до своїх обов'язків завжди призводить до відмов. Застосування налагодженої системи контролю якості робіт збільшує ефективність технічного обслуговування і знижує негативний вплив людського фактора.

Якість технічного обслуговування і ремонту значною мірою залежить від вибору варіанта технологічного процесу профілактичних або відновлювальних заходів. Технологічний процес обирається відповідно до вимог надійності, умов роботи деталей або вузлів, характеру зносу і т. д.

Наприклад, підвищення довговічності коліс вагонів може бути досягнуто торцевим фрезеруванням при повторних обточування бандажів. При цьому зберігається шар металу, наклепаний в експлуатації, а також підвищується клас чистоти обробки. Це значно збільшує пробіг між обточками порівняно з пробігом коліс, оброблених точінням, тому що при точінні наклепаний в експлуатації шар зрізається повністю.

Знос шпінтона і втулки фрикційного гасителя коливань значною мірою залежить від забезпечення їх щільного сполучення. Затягування тарілкової пружини з допомогою корончатої гайки без динамометричного ключа призводить до невизначеності зусилля, що викликає коливання втулки, передчасне спрацювання як втулки, так і шпінтона в зоні контакту.

### **Питання для самоконтролю:**

1. Які основні причини відмов елементів вагонів у процесі експлуатації?
2. Які існують методи підвищення надійності вагонів у процесі виробництва?
3. Назвіть основні заходи, що спрямовані на забезпечення безвідмовної роботи рухомого складу.
4. Для чого необхідне створення інформаційної системи і системи кодування інформації з експлуатації рухомого складу?
5. Як можливо здійснити прогнозування відмов елементів вагона?

## 9. НАДІЙНІСТЬ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

### 9.1. Загальні відомості про складні системи

Під складною системою будемо розуміти об'єкт, призначений для виконання заданих функцій, що може бути розчленований на елементи, кожний з яких виконує задані функції і перебуває у взаємодії з іншими елементами. З позиції надійності складна система має як позитивні, так і негативні властивості.

Фактори, що негативно впливають на надійність складної системи:

1. Велика кількість елементів, відмова кожного з яких може призвести до відмови всієї системи;

2. Складні системи часто є унікальними або існують у невеликій кількості. У цьому випадку обмежені можливості використання статистичних даних для оцінки дієздатності системи;

3. Навіть у системах і машинах однакового конструктивного оформлення кожний екземпляр має індивідуальні риси. У результаті незначні варіації властивостей окремих елементів відбиваються на вихідних параметрах системи.

Фактори, що позитивно впливають на надійність складних систем:

1. Складним системам притаманна у тій або іншій мірі самоорганізація, самоприспосовування, коли система сама спроможна знайти найбільш сталий для свого функціонування стан;

2. Для складної системи часто можливе відновлення дієздатності по частинах без припинення її функціонування;

3. Не всі елементи однаково впливають на надійність складних систем. Багато з них впливають лише на ефективність її роботи.

При аналізі надійності складних систем їх розбивають на елементи для того, щоб спочатку розглянути характеристики елементів, а після цього оцінити дієздатність усієї системи.

Під елементом будемо розуміти складову частину складної системи, що може характеризуватися самостійними вхідними і вихідними параметрами.



Елементи мають такі особливості:

- елемент виділяється в залежності від поставленого завдання, може бути достатньо складним і складатися з окремих деталей та вузлів;

- при дослідженні надійності системи елемент не розчленовується на складові і показник надійності стосується елемента в цілому.

При аналізі надійності складного виробу всі його елементи і деталі доцільно поділити на такі групи:

- елементи, відмова яких практично не впливає на дієздатність виробу (наприклад зміна забарвлення). Відмови цих елементів можуть розглядатися ізольовано від системи. Найчастіше це не відмови, а несправності;

- елементи, дієздатність яких за розглядуваний проміжок часу майже не змінюється (корпуси вузлів, незначно завантажені елементи з великим запасом міцності);

- елементи, ремонт або регулювання яких можливі при роботі виробу або під час зупинок, не впливає на його ефективність (заміна різального інструменту, регулювання і т. п.);

- елементи, відмова яких призводить до відмови виробу.

Елементи складної системи можуть бути з'єднані щодо надійності паралельно або послідовно.

Послідовна система характеризується тим, що відмова хоча б одного елемента призводить до відмови (рисунок 9.1).

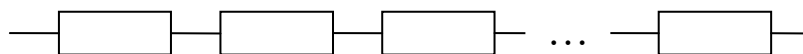


Рис. 9.1. Схема послідовної системи елементів

Імовірність безвідмовної роботи послідовної системи елементів обчислюється так:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (9.1)$$

де  $n$  - число елементів системи.

Найбільш наочним прикладом послідовних систем є автоматичні верстатові лінії, коли відмова одного з верстатів на лінії призводить до зупинки роботи всієї системи.

Елементи в системі сполучені паралельно щодо надійності, якщо відмова системи настає тоді і тільки тоді, коли відмовляють усі елементи системи (рис. 9.2).

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p_i(t)], \quad (9.2)$$

Прикладами паралельних систем є багатомоторні літаки, судна з двома машинами. У холодильних машинах рефрижераторного рухомого складу також використовується по дві холодильні машини.

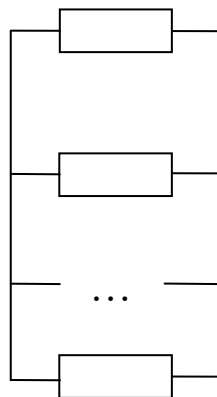


Рис. 9.2. Схема паралельної системи елементів

## 9.2. Класифікація методів резервування

При розгляді зазначених у розд. 8 способів підвищення надійності рухомого складу на етапі проектування було встановлено, що порівняно рідко вдається досягти необхідного рівня надійності лише технологічними, організаційними або конструктивними методами. У такому випадку необхідно використовувати резервування.

Резервуванням називається введення надлишковості засобів або потужностей понад мінімально необхідні для виконання об'єктом заданих функцій. Резервування є найбільш раціональним способом підвищення надійності, але використовують його тільки тоді, коли інші методи не дають змоги досягти поставленої мети. Це обумовлено тим, що резервування призводить до ускладнення окремих вузлів і вагонів у цілому, збільшення габаритів і тари вагона, а також його вартості.

Існуючі методи резервування прийнято класифікувати за такими ознаками:

- типом надлишковості;
- способом включення резервних елементів;
- режимом роботи резервних елементів.

За типом створюваної в об'єкті надлишковості розрізняють структурне, часове, інформаційне, функціональне та навантаження резервування.

Структурне резервування передбачає використання резервних елементів у структурі об'єкта, при цьому розрізняють основні та резервні елементи.

Основним називається такий елемент структурної системи об'єкта, який мінімально необхідний для виконання об'єктом заданих функцій.

Резервним називається елемент, призначений для забезпечення працездатності об'єкта в разі відмови основного елемента.

Часове резервування припускає використання надлишкового часу різними способами:

- надлишковий час припускає можливість відновлення роботи елементів вагона після усунення відмови, тобто на

виконання заданих функцій для елементів відводиться свідомо більше часу, ніж мінімально необхідно. Резервування такого типу характерно, наприклад, для систем життєзабезпечення пасажирських вагонів;

- середній час безвідмовної роботи елементів набагато більший, ніж передбачуваний час роботи вагона. Резервування такого типу застосовують, наприклад, для агрегатів і систем, що забезпечують безпеку руху.

Інформаційне резервування припускає використання надлишкової інформації про стан елементів і вузлів. Прикладом реалізації інформаційного резервування є контроль нагрівання буксового вузла кількома способами.

Функціональне резервування припускає можливість виконання додаткових функцій.

Навантажувальне резервування передбачає забезпечення полегшених режимів робіт елементів і вузлів вагонів і за рахунок цього їх здатність короткочасного сприйняття додаткового навантаження. Прикладом навантажувального резервування є застосування на візку вагона декількох фрикційних гасителів коливань, коли при відмові одного з них гасіння коливань кузова здійснюється працездатними гасителями коливань.

За способом включення елементів розрізняють постійне резервування, резервування заміщенням, змінне і мажоритарне резервування.

Постійним називається таке резервування, при якому резервні елементи беруть участь у функціонуванні об'єкта нарівні з основними. При складанні принципів схем з постійним резервуванням бажано звести до мінімуму перерозподіл навантаження на працездатні елементи після відмови одного або декількох елементів. Для цього, наприклад, в електричних схемах використовують обмежувальні резистори, схеми і ланцюги зворотного зв'язку.

Головними перевагами постійного резервування є простота внаслідок того, що не потрібні перемикальні пристрої для введення у дію резервних елементів, і відсутність перерв у роботі об'єкта.

Недолік полягає в тому, що резервні елементи перебувають під навантаженням і їх напрацювання таке ж, як і у основних.

Резервування заміщенням – резервування, при якому резервний елемент вмикається тільки після відмови основного. Застосування резервування заміщенням припускає вбудовану систему контролю для виявлення факту відмови основного елемента і перемикальних пристроїв для перемикання з основного на резервний елемент.

Порівняно з постійним резервування заміщенням має істотні переваги:

- резервні елементи до моменту їх використання можуть перебувати в полегшеному або ненавантаженому стані, що зберігає ресурс елемента, скорочує споживання і виділення енергії і, як наслідок, істотне підвищення надійності;

- використання одного і того ж елемента як резерву декількох однотипних елементів, що забезпечує економію в габаритних розмірах, вазі та вартості;

- можливість попередньої перевірки роботи резервних елементів до використання об'єкта.

До недоліків резервування заміщенням належать:

- наявність систем контролю і перемикачів, що збільшує вартість та вагу об'єкта і знижує надійність унаслідок ускладнення принципової схеми;

- перерва в роботі об'єкта або зміна його параметрів під час заміни елементів, які відмовили, резервними.

Змінним називається таке резервування, коли група основних елементів резервується одним або кількома резервними елементами, кожний з яких може замінити будь-який основний елемент, що відмовив, у даній групі.

Мажоритарне резервування є частковим випадком резервування заміщенням, коли функцію перемикання виконує елемент голосування (мажоритарний елемент). Вихідні сигнали блоків, що працюють паралельно, подаються на вихід мажоритарного елемента, який пропускає на вихід сигнал, що збігається з більшістю вихідних сигналів блоків. Таке з'єднання блоків функціонує до тих пір, поки число справних блоків хоча б на один більше від числа несправних. Змінне і мажоритарне резервування застосовуються, як правило, в системах управління.

Залежно від режиму роботи резервних елементів розрізняють навантажений, полегшений та ненавантажений резерв.

Навантаженим називається такий резервний елемент, який перебуває в тому ж режимі, що й основний. При цьому характеристики надійності основного і резервного елементів змінюються в часі однаково.

Полегшений резерв - резервний елемент перебуває в менш навантаженому режимі, ніж основні елементи. При цьому надійність полегшеного резерву зменшується повільніше, ніж основних елементів.

Ненавантаженим є такий резервний елемент, який перебуває у вимкненому стані до моменту вмикання його в роботу замість основного.

Ступінь надлишковості характеризується кратністю резервування. Кратністю резервування називається відношення числа резервних елементів до числа основних елементів об'єкта. Якщо для підвищення надійності одного основного елемента увімкнено  $n$  резервних елементів, то наявне резервування з цілою кратністю  $\alpha$ , яка дорівнює  $n$ . Резервування, кратність  $\alpha$  якого дорівнює одиниці, називається дублюванням.

При загальному резервуванні для відмови об'єкта достатньо, щоб у кожному ланцюгу відмовив хоча б один елемент, у той час при поелементному резервуванні для відмови об'єкта необхідно, щоб відмовив основний елемент і всі дублюючі його елементи.

Отже, поелементне резервування буде надійнішим від загального при однаковій кількості елементів, що характеризуються однаковою надійністю.

Поелементне резервування в рухомому складі застосовується в тих випадках, коли резервні елементи конструктивно сумісні з основними та не порушують їх функціонування.

У кожному конкретному випадку питання про доцільність виду резервування вирішується з урахуванням призначення і характеристик агрегатів і вузлів рухомого складу, заданого рівня показників надійності, вимог безпеки, габаритів, маси, вартості тощо.

## Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під терміном "складна система"?
2. Що розуміють під поняттям "елемент" у складній системі?
3. Як кількість елементів впливає на надійність складної системи?
4. Чим характеризується послідовна система елементів?
5. При якому сполученні елементів відмова системи настає тоді і тільки тоді, коли відмовляють усі елементи системи?
6. Як називається введення надлишковості засобів або потужностей понад мінімально необхідні для виконання об'єктом заданих функцій?
7. Чим характеризується ступінь надлишковості?
8. Що таке "поелементне резервування"?
9. Як сполучені між собою бокові рами візка моделі 18-100 щодо надійності: послідовно чи паралельно?

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Войнов, К. Н. Надежность вагонов [Текст] / К.Н. Войнов. – М.: Транспорт, 1989. – 110 с.
2. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.Е. Гмурман. - М.: Высш. шк., 2000. - 479 с.
3. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука., 1982. – 524 с.
4. Дзиркал, Э.В. Новые методы контрольных испытаний на надежность сложных изделий [Текст] / Э.В. Дзиркал. – М.: Знание, 1978. – 56 с.
5. Довгаль, Е.А. Основы надежности рельсового подвижного состава [Текст]: учеб. пособие / Е.А. Довгаль. – Ростов н/Д, 2003.- 116 с.
6. Конструирование и расчёт вагонов [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В.В. Лукин, Л.А. Шадур, В.Н. Котуранов [и др.]. - М.: УМК МПС России, 2000. - 731 с.
7. Костенко, Н.А. Прогнозирование надежности транспортных машин [Текст] / Н. А. Костенко. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
8. Кубарев, А.И. Надежность в машиностроении [Текст] / А.И. Кубарев. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.
9. Кузьмин, Ф.И. Задачи и методы оптимизации показателей надежности [Текст] / Ф.И. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1972. – 223 с.
10. Мартинов, І.Е. Планування випробувань високонадійних вузлів вагонів [Текст] / І.Е. Мартинов // Зб. наук. праць Київського університету економіки і технологій транспорту. – К., 2005. – Вип. 7.– С. 79-83. – Серія "Транспортні системи і технології".
11. Мартинов, І.Е. До питання оцінки показників надійності торцевого кріплення букс вантажних вагонів [Текст] / І.Е. Мартинов // Зб. наук. праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – Вип. 46. – С. 76-79.
12. Мархай, В.В. Проблемы повышения надежности буксовых узлов с подшипниками качения [Текст] / В. В. Мархай,



А. В. Донченко, И. Э. Мартынов // Перспективи впровадження технічних засобів безпеки руху поїздів: Зб. доп. п'ятої наук.-практ. конф. – Феодосія, 2003. – С. 13-16.

13. Мельничук, В.А. К вопросу повышения надежности буксовых узлов с подшипниками качения [Текст] / В.А. Мельничук, А. В. Донченко, И. Э. Мартынов // Залізничний транспорт України. – 2002. – №5. – С. 34-37.

14. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения [Текст]: ГОСТ 27.002-89. – [Введ. 90-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 24 с.

15. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности [Текст]: ГОСТ 27.003-90. – [Введ. 92-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 33 с.

16. Надежность технических систем: Справочник [Текст] / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин [и др.]; под ред. И.А. Ушакова. - М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

17. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними [Текст]: ДСТУ України 3004-95. – [Чинний від 1997-01-01]. – К.: Держстандарт, 1997. – 129 с. – (Національний стандарт України).

18. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ. - М., 1996. – 355 с.

19. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М., 1983. – 258 с.

20. Плани випробувань для контролю середнього наробітку до відмови (на відмову). Ч. 2. Дифузійний розподіл [Текст]: ДСТУ 3942-2000 (ГОСТ 27.506-2000). – [Чинний від 01-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2001. – 60 с. – (Міждержавний стандарт).

21. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Ч. 1. Экспоненциальное распределение [Текст]: ГОСТ 27.402-95. – [Введ. 99-01-01]. —К.: Держспоживстандарт України, 1998. – 44 с

22. Тартаковський, Е.Д. До питання визначення показників надійності буксових підшипників вантажних вагонів [Текст] / Е.Д. Тартаковський, І.Е. Мартинов // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 99. – С. 81-87.

23. Топольский, М.В. Методы максимального использования эксплуатационной информации о надежности [Текст] / М. В. Топольский // Вопросы экспериментальной оценки показателей надежности. – М.: Знание, 1979. – С.56-88.

24. Устич П.А. Надежность рельсового нетягового подвижного состава [Текст] / П.А. Устич, В.А. Карпычев, М.Н. Овечников. – М.: ИГ "Вариант", 1999. – 416 с.

25. Устич, П.А. Надежность вагона [Текст]: учеб. пособие / П.А. Устич, В.А. Карпычев, М.Н. Овечников. – М.: МИИТ, 1997. – 212 с.

26. Ушаков, И.А. Методы оценки надежности по результатам испытаний [Текст] / И. А. Ушаков, Ф. И. Фишбейн. – М.: Знание. 1973. – 46 с.

27. Фишбейн, Ф.И. Методы планирования испытаний для контроля показателей надежности [Текст] / Ф. И. Фишбейн. – М.: Знание, 1976. – 51 с.

28. Фишбейн, Ф.И. Методы оценки надежности по результатам испытаний [Текст] / Ф. И. Фишбейн. – М.: Знание, 1973. – 73 с.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Безвідмовність, 20  
Випадкова відмова 18  
Випадкова подія 24  
Відмова 17  
     $\gamma$  - розподіл 65  
Граничний стан 17  
Довговічність 21  
Достовірна подія 24  
Експлуатаційні відмови 19  
Закони розподілу дискретних  
    випадкових величин 31  
Залежні події 24  
Залежні відмови 19  
Збереженість 21  
Змінне резервування 96  
Імовірність безвідмовної  
    роботи 20  
Імовірність події 24  
Інтенсивність відмов 21  
Інформаційне резервування 94  
Коефіцієнт оперативної готов-  
    ності 52  
Коефіцієнт технічного викорис-  
    тання 51  
Конструкційні відмови 18  
Кратність резервування 96  
Метод найменших квадратів 79  
Модель раптових відмов 54  
Навантажувальне резерву-  
    вання 94  
Незалежні відмови 19  
Неможлива подія 24  
Непрацездатність 17  
Остаточні відмови 19  
Паралельні системи 93  
Параметр потоку відмов 21  
Повна група подій 24  
Послідовна система 92  
Постійне резервування 95  
Поступові відмови 18  
Пошкодження 17  
Працездатність 17  
Резервування заміщенням 95  
Резервування 93  
Ремонтопридатність 21  
Середнє    напрацювання    до  
    відмови 21  
Складні системи 91  
Справність 16  
Структурне резервування 94  
Ступінь надлишковості 96  
Сумісні (несумісні) події 24  
Теорема додавання ймовір-  
    ностей 26  
Теорема множення ймовір-  
    ностей 27  
Технологічні відмови 19  
Часове резервування 94  
Часткові відмови 19