

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

І. О. БОНДАРЕНКО,
Д. М. КУРГАН, М. А. АРБУЗОВ

Надійність залізничної колії

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ДНІПРОПЕТРОВСЬК
АКЦЕНТ ПП
2015

УДК 625.1-027.45(075.8)

ББК 39.20-06

Б 81

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. *Е. І. Даніленко*

д-р техн. наук, проф. *А. А. Пługін*

Рекомендовано вченою радою ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна
як навчальний посібник для студентів напряму підготовки
«Залізничні споруди та колійне господарство»
(протокол № 1 від 31.08.15)

Бондаренко, І. О.

Б 81 Надійність залізничної колії [Текст]: навчальний посібник /
І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, М. А. Арбузов; Дніпропетр. нац.
ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ :
Акцент ПП, 2015. – 158 с.
ISBN ?

У посібнику наведено терміни й визначення показників надійності. Розглянуто причини порушення працездатності елементів верхньої будови колії, моделі та методи, що застосовуються для оцінки їх безвідмовності й довговічності.

Для студентів напряму «Залізничні споруди та колійне господарство» денної та заочної форм навчання, які вивчають дисципліну «Надійність та технічна діагностика залізничної колії».

Лл. 33. Табл. 52. Бібліогр.: 17 назв.

УДК 625.1-027.45(075.8)

ББК 39.20-06

© Бондаренко І. О., Курган Д. М.,
Арбузов М. А., 2015

© Дніпропетр. нац. ун-т залізн.
трансп. ім. акад. В. Лазаряна, ре-
дагування, оригінал-макет, 2015

ISBN ?

ВСТУП

Під час вивчення дисципліни «Надійність та технічна діагностика залізничної колії» студенти повинні оволодіти знаннями про головні параметри теорії надійності, засвоїти загальні положення надійності об'єктів транспорту, характеристики ймовірності відмов елементів залізничної колії, структуру моделей надійності колії як елемента, що відновлюється та ремонтується, показники довговічності та ремонтпридатності в колійному господарстві. Також вони повинні навчитися, використовуючи нормативно-технічну документацію, довідкову та спеціальну літературу й облікову інформацію, оцінювати надійність залізничної колії та її елементів, визначати умови забезпечення потрібного рівня надійності роботи залізничних споруд та будов і системи ведення колійного господарства, за допомогою сучасної обчислювальної техніки – ЕОМ (АРМ) – розробляти план ремонтів на дільниці, із застосуванням спеціальних методик розраховувати статистичні показники, аналізувати, узагальнювати та використовувати одержані результати. Студенти мають дістати уявлення про планування й організацію ремонтів колії, планування міжремонтних термінів та інших показників ведення колійного господарства на засадах теорії надійності, про розрахунки інтенсивності відмов колії, споруд (або елементів) та наростання їх деформацій залежно від умов експлуатації.

У додатках до посібника наведено всі довідкові дані для виконання відповідних розрахунків.

Основні положення теорії надійності

1.1. Основні поняття й терміни теорії надійності

Терміни й визначення основних понять теорії надійності для використання в науці та техніці встановлені чинними стандартами [1–5]. Розглянемо їх (табл. 1.1).

Надійність – властивість об’єкта зберігати у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах та умовах експлуатації, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Об’єкт – система, споруда, машина, підсистема, апаратура, функціональна одиниця, обладнання, елемент або будь-яка його частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця. Об’єкт може включати технічні засоби, програмні засоби, технічний персонал або будь-які їх поєднання. Сукупність об’єктів, які поєднані загальним цільовим призначенням, може розглядатись як один об’єкт. Об’єктами можуть бути як системи в цілому, так і їх окремі елементи.

Система – це об’єкт, що становить собою сукупність елементів, які взаємодіють у процесі виконання визначеного переліку завдань та взаємопов’язані функціонально.

Елемент – це об’єкт, що являє собою найпростішу частину системи, подальше розкладання якої на складові не має сенсу в рамках розв’язання конкретного завдання. Елемент як частина системи не має самостійного експлуатаційного призначення за межами системи та виконує в ній задані функції. Необхідно зазначити, що надійність системи в цілому і надійність будь-якого її елемента – це різні поняття, які оцінюються різними показниками надійності.

Класифікація основних понять теорії надійності

Поняття	Класифікація
Властивості надійності	Безвідмовність Довговічність Ремонтопридатність Збережуваність Готовність
Стан об'єкта	Справний Несправний Працездатний Частково працездатний Непрацездатний Критичний Граничний
Події	Ушкодження Часткова відмова Повна відмова Вичерпання ресурсу
Часові поняття	Напрацювання Ресурс Термін служби Термін зберігання
Види об'єктів	Об'єкти, що обслуговуються Об'єкти, що не обслуговуються Відновлювані Невідновлювані Об'єкти, що ремонтуються Об'єкти, що не ремонтуються
Показники надійності	Безвідмовність Довговічність

Поняття	Класифікація
Показники надійності	Ремонтопридатність Збережуваність Готовність Комплекси

Безвідмовність – властивість об’єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу чи деякого напрацювання.

Довговічність – властивість об’єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану за встановленої системи поточного утримання та ремонтів.

Ремонтопридатність – властивість об’єкта, що полягає в пристосованості до запобігання й виявлення причин виникнення його відмов і ушкоджень, а також у підтримці й відновленні працездатного стану за рахунок виконання передбачених нормативно-технічною документацією ремонтів і поточного утримання.

Збережуваність – властивість об’єкта зберігати значення показників безвідмовності, довговічності й ремонтпридатності протягом і після зберігання і (або) транспортування.

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

Справним називається такий стан об’єкта, за якого він відповідає всім вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації. Якщо наявна невідповідність хоча б одній з вимог, то такий стан називається **несправним**. Ознакою несправного стану є поява технічного дефекту або ушкодження в ході експлуатації.

Працездатним називається такий стан об’єкта, за якого він здатний виконувати задані функції, що відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Частково працездатний стан об'єкта настає, коли об'єкт ще здатний виконувати свої функції, але зі зниженими параметрами порівняно із зазначеними у вимогах нормативно-технічної і (або) конструкторської документації (наприклад, усі стани колії, коли відбувається пропуск поїздів з обмеженими швидкостями). Перехід об'єкта з працездатного в частково працездатний стан наявний, коли відбувається подія, що має назву «часткова відмова».

Стан, за якого об'єкт не здатний виконувати задані функції, називається **непрацездатним**. Перехід об'єкта з працездатного в непрацездатний стан відбувається, коли настає подія, що має назву «відмова».

Несправний об'єкт може бути працездатним. Наприклад, наявність зносу рейок у допустимих для заданих умов експлуатації залізничної колії нормах означає її несправний стан, але така колія працездатна, або наявність у об'єкта будь-яких відступів від параметрів, встановлених нормативно-технічною і (або) конструкторською документацією, але допустимих для заданих умов експлуатації залізничної колії: ширина колії в межах 1 510...1 516 мм і 1 528...1 548 мм.

Непрацездатний об'єкт одночасно є і несправним.

Критичним є стан об'єкта, що може призвести до травмування людей, значних матеріальних збитків або інших неприйнятних наслідків.

Міждержавний стандарт ГОСТ 32192-2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения» замість критичного передбачає два стани:

– передвідмовний стан (залізничної техніки): несправний стан залізничної техніки, при якому ймовірність її переходу в непрацездатний стан протягом заданого напрацювання не перевищує допустимого значення;

– небезпечний стан (залізничної техніки): несправний стан залізничної техніки, при якому виникають ризики заподіяння шкоди життю та здоров'ю громадян, майну фізичних та юридичних осіб, державному й муніципальному майну, навколишньому середовищу, життю і здоров'ю тварин і рослин, що перевищують допустимі рівні.

Граничним називається стан об'єкта, за якого його подальше застосування за призначенням недопустиме або недоцільне або відновлення його працездатного стану неможливе або недоцільне.

Граничний стан настає після вичерпання ресурсу. У такому разі об'єкт списується або направляється в ремонт.

Дефект – кожна окрема невідповідність об'єкта встановленим вимогам.

Ушкодження – подія, що полягає в порушенні справного стану (за умови збереження працездатності) об'єкта, за якого забезпечується виконання цим об'єктом своєї функції.

Відмова – подія, що полягає в переході об'єкта з працездатного стану в непрацездатний.

Збій – самоусувна відмова або одноразова відмова, яку незначним втручанням усуває оператор. ГОСТ 32192-2013 трактує збій як подію, при якій залізнична техніка не виконує хоча б одну з передбачених технічними вимогами функцій протягом часу, який менший за допустимий, встановлений в технічній документації.

Вичерпання ресурсу – подія, що полягає в поступовому переході об'єкта з працездатного в непрацездатний стан, досягши якого об'єкт потребує заміни або капітального ремонту.

Критерій відмови – розпізнавальна ознака або сукупність ознак, згідно з якими встановлюється факт виникнення відмови. Ознаки (критерії) відмов встановлюються відповідно до нормативно-технічної документації на об'єкт.

Класифікація відмов за ознаками згідно з [1] наведена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Класифікація відмов

Ознака	Вид відмови
Характер усування	Остаточна
	Змінна (то виникає, то з'являється)
Значущість	Критична
	Істотна
	Несуттєва
Залежність виникнення від попередньої відмови	Залежна
	Незалежна

Ознака	Вид відмови
Характер виникнення	Раптова
	Поступова
Характер виявлення	Явна
	Прихована
Причина виникнення	Конструктивна
	Виробнича
	Експлуатаційна
	Технічна
	Технологічна
	Деградаційна

Для кількісної характеристики кожної з властивостей надійності окремого об'єкта існують такі часові поняття, як напрацювання (напрацювання до відмови, напрацювання між відмовами), ресурс, термін служби, термін зберігання, час відновлення. Значення цих величин одержують за даними експлуатації або випробувань кожного окремого об'єкта. Значення цих характеристик, отримані за експериментальними даними, є основою для подальшого обчислення оцінок таких показників надійності, як середнє напрацювання на відмову, середній ресурс та ін.

Напрацювання – це часове поняття, що служить для кількісної оцінки надійності об'єкта й характеризує тривалість або обсяг його роботи. Напрацювання, залежно від специфічних особливостей об'єкта, може вимірюватися в годинах, кількості циклів навантаження, одиницях пропущеного тоннажу, кілометрах пробігу й інших величинах.

Напрацювання до відмови обчислюється від початку експлуатації об'єкта до виникнення першої відмови; *напрацювання між відмовами* обчислюється від закінчення відновлення працездатного стану після відмови до виникнення наступної відмови; *напрацювання на відмову* визначається як відношення напрацювання об'єкта, що відновлюється за деякий період часу, до математичного сподівання кількості відмов протягом цього напрацювання.

Ресурс обчислюється як сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Термін служби виражається в одиницях календарної тривалості й обчислюється так само, як і ресурс, – від початку експлуатації об'єкта або її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан (терміни служби до виконання модернізації або капітального ремонту колії для всіх категорій колії встановлені «Положенням про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України»). Таким чином, відмінність ресурсу від терміну служби полягає тільки в одиницях виміру.

Термін зберігання обчислюється як календарна тривалість зберігання і (або) транспортування об'єкта, протягом і після яких значення показників надійності залишаються у встановлених межах.

Відновлення – процес виявлення й усунення відмови (пошкодження) з метою відновлення працездатності (справності) об'єкта.

Час відновлення характеризує календарну тривалість операцій з відновлення працездатного стану об'єкта або тривалість операцій з технічного обслуговування й ремонту.

Залежно від того, передбачені чи не передбачені нормативно-технічною і (або) конструкторською документацією для даного об'єкта операції технічного обслуговування чи ремонту, об'єкти підрозділяються відповідно на такі, **що обслуговуються і не обслуговуються, ремонтуються та не ремонтуються**. Залежно від того, можливо чи неможливо для даного об'єкта відновлення працездатного стану в конкретній ситуації і (або) передбачене чи не передбачене таке відновлення в нормативно-технічній і (або) конструкторській документації, вони підрозділяються на **відновлювані й невідновлювані**. Той самий об'єкт може бути як відновлюваним, так і невідновлюваним залежно від його цільового призначення й умов використання. Наприклад, гостродефектні рейки, які вилучають з конструкції колії, є невідновлюваними об'єктами, а дефектні рейки, які відновлюють за допомогою шліфування або наплавлення, – відновлюваними.

1.2. Показники надійності

1.2.1. Основні характеристики показників надійності залізничної колії

Для кількісної характеристики надійності залізничної колії використовуються показники надійності.

Показник надійності – це кількісна характеристика однієї або декількох властивостей, що становлять надійність об'єкта. Числові значення показників можуть бути виражені розмірними або безрозмірними величинами. Формулювання показника звичайно відображає і спосіб визначення його числового значення – розрахунковим або дослідним шляхом.

Показник надійності кількісно характеризує, у якій мірі певному об'єкту або групі об'єктів притаманні визначені властивості надійності. Одиночні показники відбивають одну з властивостей надійності й залежно від цього підрозділяються на показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності й збережуваності. Комплексні показники описують одночасно кілька властивостей.

Для об'єктів різного призначення та будови використовують різні показники надійності. Зараз виділяють чотири види об'єктів, що відрізняються різними показниками та методами оцінки надійності:

1) об'єкти, що не ремонтуються та використовуються до першої відмови (невідновлювані об'єкти);

2) об'єкти, що ремонтуються та відновлення яких у процесі використання неможливе (невідновлювані об'єкти);

3) об'єкти, що ремонтуються та відновлюються і для яких у процесі використання недопустимі перерви в роботі (відновлювані об'єкти);

4) об'єкти, що ремонтуються та відновлюються і для яких у процесі використання допустимі перерви в роботі (відновлювані об'єкти).

Сформулюємо основні терміни й визначення щодо надійності.

Надійність колії – властивість колії зберігати у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують її здатність виконувати необхідні функції (безперервний пропуск поїздів з установленою швидкістю) у заданих умовах експлуатації (поточного утримання й ремонтів).

Кількісно надійність колії оцінюється числовими значеннями показників її безвідмовності, довговічності й ремонтпридатності.

Справний стан – стан колії без відступів від норм і допусків щодо її устрою та утримання (відступи першого ступеня).

Працездатний стан колії – стан колії з відступами від зазначених норм і допусків, якщо забезпечується безпечний пропуск поїздів з установленою швидкістю (відступи другого та третього ступенів).

Частково працездатний стан колії – стан колії з відступами від норм і (або) допусків щодо її устрою і (або) утримання, за якого ще забезпечується безпечний пропуск поїздів, але з обмеженою швидкістю (місцеве обмеження швидкості). Значення параметрів, після досягнення яких обмежується швидкість, регламентовані нормативно-технічною документацією УЗ (відступи четвертого ступеня).

Непрацездатний стан колії – стан колії, за якого значення хоча б одного параметра, що характеризує здатність безпечно пропускати поїзди, не відповідає вимогам нормативно-технічної документації УЗ.

Граничний стан колії – стан колії, за якого її подальша експлуатація без капітального ремонту (відновлення верхньої будови) неприпустима з погляду безпеки руху поїздів або з економічних міркувань.

Напрацювання – кількість пропущеного вантажу, млн т бруто.

Довговічність колії – властивість колії зберігати працездатний стан до часу появи граничного стану за встановленої системи поточного утримання й ремонтів.

Ремонтпридатність колії – властивість колії, що полягає в пристосованості до запобігання й виявлення причин виникнення її відмов і ушкоджень, а також у підтримці й відновленні працездатного стану за рахунок виконання передбачених нормативно-технічною документацією ремонтів і поточного утримання.

Ремонт колії – визначається за ДСТ 18322–78 і нормативно-технічними документами УЗ.

Поточне утримання колії – визначається за ДСТ 18322–78 і інструкцією з поточного утримання колії.

Ушкодження колії – подія, що полягає в порушенні справного стану (за умови збереження працездатності) колії, за якого забезпечується безпечний пропуск поїздів з установленою швидкістю.

Часткова відмова колії – подія, що полягає в місцевому частковому порушенні працездатного стану колії, у результаті якого потрібно місцеве обмеження швидкості.

Місце з частковою відмовою відгороджується сигналами зменшення швидкості. Ознаки і параметри часткових відмов, місця яких потребують огороження сигналами зменшення швидкості, регламентовані нормативно-технічною документацією УЗ.

Повна відмова колії – подія, що полягає в місцевому повному порушенні працездатного стану колії (з припиненням руху поїздів), у результаті якого потрібно тимчасове (до відновлення працездатного стану) огороження місця відмови сигналами зупинки. Ознаки й параметри відмов, місця яких потребують огороження сигналами зупинки, регламентовані нормативно-технічною документацією УЗ.

Раптова відмова колії – відмова, що характеризується стрибкоподібною зміною одного чи декількох заданих параметрів колії до величини, що перевищує допустиме значення із забезпечення працездатного стану.

Поступова відмова колії – відмова, що виникли в результаті поступової зміни значення одного чи декількох заданих параметрів колії до величини, що перевищує допустиме значення із забезпечення працездатного її стану.

Виробнича відмова колії – відмова, що виникла в результаті порушення встановленого процесу виготовлення (виробництва) колії і її елементів.

Технологічна відмова колії – відмова, передбачена технологічними процесами виконання колійних робіт з ремонту й поточного утримання колії (в основному це часткові відмови).

Технічна відмова колії – відмова, що виникає в результаті нагромадження в процесі експлуатації ушкоджень від втоми та зносу і залишкових деформацій колії за умови дотримання чинної нормативно-технічної документації з її утримання.

Експлуатаційна відмова колії – відмова, що виникає в результаті порушення встановлених правил експлуатації колії і її поточного утримання.

Відмови першої групи – відмови колії, що впливають на процес перевезень (затримки або запізнення поїздів).

Відмови другої групи – відмови колії, що не впливають на процес перевезень (не затримують або не викликають запізнень поїздів).

Причини відмов – явища, процеси, події і стани, що зумовили виникнення відмов колії.

Відмови першого типу – відмови колії, що піддаються прогнозуванню. Це технічні й технологічні відмови.

Відмови другого типу – відмови колії, що не піддаються прогнозуванню. Це виробничі й експлуатаційні відмови, а також відмови, зумовлені природними стихійними явищами (розмиви, замети і т. ін.).

1.2.2. Показники безвідмовності

Уже зазначалося, що надійність колії в цілому й надійність будь-якого її елемента – це різні поняття, які оцінюються різними показниками надійності. Зумовлено це тим, що колія в цілому є об'єктом надійності, що ремонтується та відновлюється після відмови в процесі функціонування, а окремі її елементи є об'єктами надійності, що за таких самих умов не ремонтуються і не відновлюються, а замінюються. Для об'єктів, що не ремонтуються в умовах функціонування, основними показниками надійності є імовірність безвідмовної роботи й середнє, чи гамма-процентне, напрацювання до відмови. Оскільки із загальної кількості повних відмов колії (місця, на яких до відновлення працездатного стану припиняють рух і які відгороджуються сигналами зупинки) більше 95 % складають одиночні відмови рейок, то як основний показник надійності колії на мережі в цілому, залізниці чи дистанції звичайно використовується відповідний середній по мережі (залізниці або дистанції) показник N одиночних відмов рейок за рік на 1 км розгорнутої довжини головної колії мережі (залізниці або дистанції). Розділивши значення N відповідно на середню по мережі, залізниці або дистанції вантажонапруженість брутто G , одержимо середнє значення параметра потоку повних відмов α , а розділивши G на N , – середнє значення напрацювання на відмову β .

Залежно від виду об'єкта його надійність може включати тільки частину складових властивостей надійності. Так, для об'єктів, які не підлягають ремонту (залізобетонні шпали, деталі скріплень відновленню безпосередньо в колії не підлягають; їх надійність характеризується напрацюванням на відмову чи параметром потоку відмов), у властивість надійності не включаються довговічність і ремонтпридатність, для них важлива тільки властивість безвідмовності, а для об'єктів, що підлягають тривалому збереженню (покілометровий запас), враховується ще і властивість збережуваності.

1.2.2.1. Показники безвідмовності для невідновлюваних об'єктів

Якщо об'єкт не відновлюється, то всі відмови належать до рапто-вих. Показник безвідмовність оцінюється такими параметрами.

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ – функція надійності, що визначає ймовірність безвідмовної роботи елемента за час триваліс-тю t . Визначається як відношення кількості працездатних елементів у розглянутій інтервал напрацювання $N(t_i)$ до загальної кількості елементів N_0 :

$$P(t) = \frac{N(t_i)}{N_0}. \quad (1)$$

За цим параметром нормується клас надійності об'єктів. Професор А. С. Проніков [6] запропонував таку градацію норм надійності за класами:

Клас надійності	0-й	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Допустимі значення $P(t)$	$<0,9$	$\geq 0,9$	$\geq 0,99$	$\geq 0,999$	$\geq 0,9999$	1

До нульового класу включено елементи, відмова яких практично не має наслідків. До 1-го та 2-го класів входять вироби, відмова яких призводить до економічних втрат. До 3-го та 4-го класів включено вироби, результатом відмови яких є невиконання завдання або аварії. П'ятий клас складають високонадійні вироби, відмова яких у заданий період не допустима.

Існуючий рівень надійності елементів верхньої будови колії невеликий. За даними [7], імовірність безвідмовної роботи рейок типу Р65 (на кінець міжремонтного періоду) становить 0,90...0,99, типових рейкових скріплень для залізобетонних шпал – 0,80...0,90 [8], залізо-бетонних шпал – 0,95...0,99 [8], колії в цілому – 0,97...0,98 [9].

Іноді існує необхідність визначення ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі $(t_1; t_2)$, тобто ймовірність того, що об'єкт працюватиме без відмов у інтервалі $\Delta t = t_2 - t_1$ за умови, що досі цей об'єкт працював безвідмовно. У такому випадку за правилами множення ймовірностей [10] маємо:

$$P(t_i, t_j) = P(t_2)/P(t_1). \quad (2)$$

Імовірність відмови $F(t)$ – імовірність виникнення принаймні однієї відмови в заданому діапазоні напрацювання. Визначається як відношення кількості елементів, що відмовили в розглянутий діапазон, $r(t_i)$ до загальної кількості елементів N_0 або як накопичення відносної частоти відмов W_i в інтервалах Δt , з яких складається означений діапазон:

$$F(t) = r(t_i) / N_0. \quad (3)$$

$$W_i = n_i / N_0. \quad (4)$$

$$F(t) = \sum W_i = \sum n_i / N_0, \quad (5)$$

де n_i – кількість відмов за інтервал напрацювання Δt .

Як для повної групи (розглянуто всю кількість об'єктів), природно, що $F(t) + P(t) = 1$, $r(t_i) + N(t_i) = N_0$.

Щільність розподілу напрацювання до відмови $f(t)$ – імовірність виникнення відмови в даному інтервалі напрацювання об'єкта, що взятий випадково з множини всіх об'єктів. При цьому не відомо працездатний цей об'єкт чи ні, тому $f(t)$ як самостійна характеристика застосовується дуже рідко. Точніше, цей параметр відображає щільність розподілу часу безвідмовної роботи. Він показує середню кількість відмов за одиницю часу, що припадає на один досліджуваний елемент. Визначається як відношення кількості відмов n_i за деякий інтервал напрацювання Δt до загальної кількості відмов N_0 .

$$f(t_i) = n_i / (N_0 \Delta t) = W_i / \Delta t. \quad (6)$$

$$f(t_i) = F(t)' = -P(t)'. \quad (7)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t_i) dt. \quad (8)$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t_i) dt. \quad (9)$$

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – характеризує ймовірність відмов елемента за одиницю часу Δt після даного моменту часу t за умови, що до цього моменту він працював без відмов. Тобто $\lambda(t)$ показує загрозу появи відмови елемента в інтервал Δt при тому, що до цього часу елемент працював безвідмовно. $\lambda(t)$ – це локальна характеристика, що визначає надійність елемента в кожний даний момент часу та демонструє відносну швидкість зменшення функції надійності зі збільшенням інтервалу напрацювання. Вона показує середню кількість відмов за одиницю часу, що припадає на один справний елемент. Визначається як відношення кількості об’єктів, що відмовили, n_i до кількості працездатних об’єктів $N(t_i)$ за одиницю напрацювання Δt (або як відношення функції щільності розподілу $f(t)$ до функції безвідмовної роботи $P(t)$).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{n_i}{N(t_i)\Delta t}. \quad (10)$$

Середнє напрацювання до відмови – математичне сподівання величини напрацювання до відмови.

$$T_{\text{сеп}} = \frac{\sum t_i n_i}{N_0}. \quad (11)$$

$$T_{\text{сеп}} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (12)$$

Іноді на практиці виникає необхідність визначити:

1) середнє корисне напрацювання за умови, що в разі досягнення напрацювання t_1 всі об’єкти, що залишилися працездатними, будуть зняті з експлуатації, \bar{T}_{t1} :

$$\bar{T}_{t1} = \int_0^{t_1} P(t) dt. \quad (13)$$

Під час визначення \bar{T}_{t_1} врахуємо, що $P(t_1)N_0$ об'єктів безвідмовно працюють у інтервалі $(0; t_1)$, а решта відмовить на цьому інтервалі.

2) середню тривалість майбутньої роботи за умови, що об'єкт безвідмовно працював у інтервалі $(0; t_1)$, \hat{T}_{t_1} :

$$\hat{T}_{t_1} = \frac{1}{P(t_1)} \int_{t_1}^{\infty} P(t) dt. \quad (14)$$

Між всіма середніми напрацюваннями існує залежність

$$T_{\text{сер}} = \bar{T}_{t_1} + \hat{T}_{t_1}. \quad (15)$$

Якщо вибірка отримана у випадковому порядку (рандомізована) і має достатній обсяг (репрезентабельна), за вибірковими статистиками можливо оцінити генеральні статистики. Основні статистики – це математичне сподівання (середнє значення) $T_{\text{сер}}$, дисперсія D та середньоквадратичне відхилення S .

$$D = \frac{\sum (t_i - T_{\text{сер}})^2}{N_0 - 1}. \quad (16)$$

$$D(t) = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - \left(\int_0^{\infty} t f(t) dt \right)^2 = 2 \int_0^{\infty} t P(t) dt - T_{\text{сер}}^2. \quad (17)$$

$$S = \sqrt{D}. \quad (18)$$

Вибіркові статистики дають оцінку генеральних статистик з певною похибкою. Ця похибка може бути оцінена за допомогою процедури визначення довірчих інтервалів для генеральних статистик. Для цього знаходять середньоквадратичне відхилення похибки S^* . За заданим рівнем ймовірності α , наведеним у табл. Д.1, залежно від кількості оглянутих об'єктів N_0 знаходять значення розподілу похибки t_{α} [10]. Потім визначають довірче відхилення ε , довірчі межі T_{min} і T_{max} та коефіцієнт варіації v_t [10]:

$$S^* = S/\sqrt{N_0}. \quad (19)$$

$$\varepsilon = S^* t_\alpha. \quad (20)$$

$$T_{\max} = \varepsilon + T_{\text{сер}}. \quad (21)$$

$$T_{\min} = T_{\text{сер}} - \varepsilon. \quad (22)$$

$$v_t = S/T_{\text{сер}}. \quad (23)$$

Установлене безвідмовне напрацювання t_n – економічно обґрунтоване або задане напрацювання, яке забезпечується конструкцією, технологією й експлуатацією і в межах якого об’єкт повинен перебувати в працездатному стані.

1.2.2.2. Показники безвідмовності для відновлюваних об’єктів

Відновлювані об’єкти – це об’єкти, що ремонтуються, і після відмови та усунення несправностей знову здатні виконувати функції із заданими кількісними показниками надійності [1, п. 3.1.6]. Відновлювані об’єкти поділяються на ті, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання, та ті, що ремонтуються та відновлюються в процесі використання.

Для відновлюваних об’єктів застосовують всі показники безвідмовності для невідновлюваних об’єктів (п. 1.2.2.1) та додаткові, які розглянемо нижче.

Провідна функція – параметр, що визначає середнє значення кількості відмов на один об’єкт за період напрацювання t ; визначається як відношення кількості відмов об’єкта $r(t_i)$ до обсягу вибірки N_0 .

$$\Omega(t) = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{r(t_i)}{N_0}, \quad (24)$$

або

$$\left. \begin{aligned} \Omega(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} nP_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t), \\ \Omega(t) &= F(t) + \int_0^t \Omega(t-\tau)dF(\tau). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

де n – кількість відмов;

$P_n(t)$ – імовірність безвідмовної роботи n -го об'єкта;

$F_n(t)$ – імовірність відмови n -го об'єкта;

τ – час безвідмовної роботи об'єкта;

t – час експлуатації об'єкта.

Цей параметр показує середнє значення відновлень, що відбулися за час до моменту t . Тому іноді провідну функцію називають функцією відновлень [11]. Так, середня кількість відмов або відновлень на ділянці $(t_1; t_2)$ дорівнює $\Omega(t_2) - \Omega(t_1)$. Ця функції відіграє найважливішу роль, оскільки всі інші параметри визначаються за її допомогою.

Середнє напрацювання на відмову $t_{\text{відм}}$ – середнє значення напрацювання об'єкта, що відновлюється (ремонтується), між відмовами. Якщо напрацювання t для всієї вибірки однакове, то $t_{\text{відм}}$ розраховується за першим і другим виразами (26), якщо різне, то за третім виразом. Якщо маємо початок періоду роботи t_1 та кінець t_2 – то за останнім виразом:

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{відм}} &= \frac{t}{\Omega(t)} = \frac{N_0 t}{\sum_{i=1}^{N_0} r(t_i)}, \\ t_{\text{відм}} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{\sum_{i=1}^{N_0} r(t_i)}, \\ t_{\text{відм}} &= \frac{t_2 - t_1}{\Omega(t_2) - \Omega(t_1)}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Параметр потоку відмов – середня кількість відмов на один об’єкт за одиницю напрацювання.

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1}{t_{\text{відм}}} = \frac{\Omega(t_2) - \Omega(t_1)}{t_2 - t_1} = \Omega'(t), \\ \omega &= \frac{\sum_{i=1}^{N_0} r(t_i)}{N_0 t} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} r(t_i)}{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Якщо перейти до границь (продиференціювати), то одержимо імовірне значення для генеральної сукупності ($N_0 \rightarrow \infty$).

Параметр потоку відмов може бути визначений як імовірність відмов виробів за одиницю часу в момент t і за аналогією з об’єктами, що не ремонтуються, відповідає щільності відмов $f(t)$.

Тоді значення провідної функції можна здобути за такою формулою:

$$\Omega(t) = \int_0^{\infty} \omega(t) dt. \quad (28)$$

Дисперсія числа відмов визначається як

$$D = 2 \int_0^t \Omega(t - \tau) d\Omega(t) + \Omega(t) - (\Omega(t))^2. \quad (29)$$

Гамма-процентне напрацювання на відмову – на практиці в разі досягнення граничного стану безпека й надійність експлуатації об’єкта не гарантується, оскільки ймовірність відмов різко зростає, тому встановлюється гамма-процентний ресурс напрацювання, за період якого об’єкт не досягне граничного стану із заданою ймовірністю $P(R_\gamma) = \gamma/100$.

Оцінка похибок, які даються вибілковими статистиками, виконується таким самим чином, як і для невідновлюваних об’єктів.

1.2.3. Показники збережуваності

Середній термін збережуваності – календарна тривалість зберігання і (або) транспортування об'єкта, протягом і після яких значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, перебувають у заданих межах.

Гамма-процентний термін зберігання – термін, протягом якого об'єкт зберігає значення показників надійності у встановлених межах із заданою ймовірністю $1 - \gamma$.

Призначений термін зберігання – календарна тривалість зберігання і (або) транспортування об'єкта, досягши якої зберігання повинно бути припинено незалежно від його технічного стану.

Установлений термін зберігання (термін зберігання) – економічно обґрунтована або задана календарна тривалість зберігання і (або) транспортування об'єкта, у межах якої значення показників надійності повинні перебувати у встановлених межах.

Гарантійне напрацювання – напрацювання, до завершення якого виробник гарантує виконання технічних умов на продукцію в разі дотримання умов експлуатації, зберігання і транспортування.

1.2.4. Показники довговічності

Для об'єктів, що не відновлюються і не ремонтуються, головним показником надійності є безвідмовність.

Для оцінки надійності відновлюваних об'єктів показника безвідмовності недостатньо, необхідно в першу чергу оцінити їх довговічність.

Довговічність оцінюється особливим показником, що має назву ресурс. Ресурс – величина випадкова. Він може бути описаний функцією розподілу $F(t)$, а його закон розподілу – щільністю ймовірності $f(t) = F'(t)$.

Його статистика – середній ресурс T_p , дисперсія D і середньоквадратичне відхилення S .

Гамма-процентний ресурс – напрацювання, протягом якого об'єкт не досягає граничного стану із заданою ймовірністю $1 - \gamma$. На практиці в разі досягнення граничного стану безпека й надійність експлуатації об'єкта не гарантується, оскільки ймовірність відмов

різко зростає, тому встановлюється гамма-процентний ресурс $P(R_\gamma) = \gamma/100$.

Призначений ресурс – сумарне напрацювання, у разі досягнення якого застосування об'єкта за призначенням повинно бути припинено незалежно від його технічного стану [1, п. 3.4.6].

Установлений ресурс – економічно обґрунтована або задана величина ресурсу, забезпечена конструкцією, технологією й експлуатацією, у межах якої об'єкт не повинен досягати граничного стану.

Термін служби виражається в одиницях календарної тривалості й обчислюється так само, як і ресурс, від початку експлуатації об'єкта або її поновлення до переходу в граничний стан. Таким чином, відмінність ресурсу й терміну служби полягає тільки в одиницях виміру.

Середній ремонтний ресурс – середній ресурс між суміжними капітальними ремонтами об'єктів.

Середній ресурс до списання – середній ресурс об'єкта від початку його роботи до списання.

Середній термін служби – статистика терміну служби, математичне сподівання терміну служби. Для відновлюваного об'єкта середній термін служби являє собою середню календарну тривалість експлуатації об'єкта від її початку або поновлення до переходу в граничний стан.

Середній ресурс – математичне сподівання ресурсу, являє собою середнє напрацювання об'єкта від початку його експлуатації чи її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

У експлуатації дуже важливо так підібрати параметри об'єкта щодо потужності, стратегії технічного обслуговування й ремонту, режимів роботи, щоб термін служби і термін спрацьовування ресурсу збігалися. Досвід експлуатації об'єктів масового виробництва показує, що як напрацювання на відмову, так і напрацювання між відмовами мають значний статистичний розкид. Аналогічний розкид мають також ресурс і термін служби. Цей розкид залежить від технологічної культури й дисципліни, а також досягнутого рівня технології – як виготовлення об'єктів, так і їх експлуатації (використання за призначенням, технічного обслуговування, ремонту). Розкид напрацювання до першої відмови, ресурсу й терміну служби можна зменшити за рахунок збільшення їх значень вищеназваними способами.

Оскільки середній і капітальний ремонт дозволяють частково або повністю відновити ресурс, то відлік напрацювання під час визначення ресурсу відновлюють після закінчення такого ремонту, розрізняючи у зв'язку з цим доремонтний, міжремонтний, післяремонтний і повний (до списання) ресурс. Повний ресурс відраховують від початку експлуатації об'єкта до його переходу в граничний стан, що відповідає остаточному припиненню експлуатації.

Аналогічно виділяють і види терміну служби. Співвідношення значень ресурсу й терміну служби залежить від інтенсивності використання об'єкта. Повний термін служби, як правило, включає тривалість усіх видів ремонту, тобто враховується календарний термін.

Для невідновлюваного об'єкта ресурс є середньою тривалістю роботи повністю або до настання граничного стану. Практично ця величина повністю збігається із середнім напрацюванням.

Гамма-процентний термін служби – термін служби за період, протягом якого об'єкт зберігає значення показників надійності у встановлених межах із заданою імовірністю та не досягає граничного стану (чисельно рівний заданій величині γ в процентах).

Призначений термін служби – календарна тривалість експлуатації, після закінчення якої застосування об'єкта за призначенням повинне бути припинено незалежно від його технічного стану.

Установлений термін служби – економічно обґрунтована або задана величина терміну служби, забезпечена конструкцією, технологією й експлуатацією, у межах якої об'єкт не повинний досягати граничного стану.

1.2.5. Показники ремонтпридатності

Під час кількісного визначення ремонтпридатності, яка властива тільки відновлюваному об'єкту, час відновлення є випадковою величиною, залежною від низки чинників: характеру відмови; пристосованості об'єкта (пристрою, установки та ін.) до швидкого виявлення відмови; кваліфікації обслуговуючого персоналу; наявності технічних засобів; швидкості заміни елемента, що відмовив, в об'єкті та ін.

Головним показником ремонтпридатності є час відновлення.

Час відновлення – показник, що характеризує календарну тривалість операцій з відновлення працездатного стану об'єкта або тривалість операцій з технічного обслуговування й ремонту.

Час відновлення – це час, витрачений на виявлення, пошук причини відмови й усунення її наслідків. Досвід показує, що в складних системах 70–90 % часу відновлення витрачається на пошук елемента, що відмовив.

Середній час відновлення працездатного стану – статистика часу відновлення. Середній час відновлення – це математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови. З визначення випливає, що

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i. \quad (30)$$

де n – кількість відновлень, що дорівнює кількості відмов;

τ_i – час відновлення, год.

Показник T_B можна визначити й на основі статистичних даних, отриманих для M однотипних відновлюваних об'єктів. Структура розрахункової формули залишається тією самою:

$$T_B = \frac{\sum_{j=1}^M \tau_j}{\sum_{j=1}^M n_j}, \quad (31)$$

де M – кількість однотипних об'єктів, для кожного з котрих визначено загальний час відновлення τ_j за заданий час спостереження.

$$\tau_j = \sum_{i=1}^{n_j} \tau_{ij}, \quad (32)$$

де n_{ij} – кількість відновлень j -го об'єкта за час спостереження, причому $1 \leq j \leq M$;

τ_{ij} – час відновлення j -го об'єкта після i -ї відмови.

Інтенсивність відновлення – це відношення умовної щільності вірогідності відновлення працездатного стану об'єкта, визначеної для даного моменту часу за умови, що до цього моменту відновлення не було завершено, до тривалості цього інтервалу.

Статистична оцінка цього показника визначається як

$$\mu(t) = \frac{n_B \Delta t}{N_{\text{H.сер}} \Delta t}. \quad (33)$$

де $n_B \Delta t$ – кількість відновлень однотипних об'єктів за інтервал Δt ;
 $N_{\text{H.сер}}$ – середня кількість об'єктів, що перебувають у невідновленому стані на інтервалі Δt .

Середній час простою – математичне сподівання випадкового часу змушеного регламентованого перебування об'єкта в непрацездатному стані.

У ході детальніших розрахунків показників надійності об'єктів, що ремонтуються (відновлюються), визначається такий показник ремонтпридатності, як **процентний час відновлення** γ . Це час, протягом якого відновлення працездатності об'єкта буде здійснено з імовірністю γ , вираженою у відсотках.

У цілому для всієї системи, наприклад для залізничної колії, під час експлуатації показники ремонтпридатності змінити практично неможливо. Вони встановлюються самою конструкцією і рівнем автоматизації і механізації під час поточного утримання й періодичних ремонтів (час на виконання робіт із суцільного затягування болтів скріплень, контролю температури закріплення пліти; час на виконання операцій з усунення гостродефектної рейки в безстиковій та ланкової колії та інші операції). Ці показники закладаються в систему в ході проектування; якщо цього не зроблено, то середній час відновлення може бути досить великим.

Відомо кілька способів підвищення показників ремонтпридатності на стадії проектування: резервування, дублювання та застосування модульного принципу об'єктів або їхніх головних пристроїв.

Резервування – метод підвищення надійності об'єкта введенням додаткових елементів та функціональних можливостей понад мінімально необхідні для нормального виконання об'єктом заданих функцій. Існує часове резервування, структурне, функціональне, навантажене та інформаційне, а також загальне, роздільне та ковзне.

Прикладом резервування можуть служити наявність покілометрового запасу рейок, інвентарні рейки, наявність інших колій, паралельний хід.

Основний елемент – елемент об’єкта, необхідний для виконання потрібних функцій без використання резерву.

Резервний елемент – елемент, призначений для виконання функцій основного елемента в разі його відмови.

Навантажений резерв – резерв, що містить один або декілька резервних елементів, які перебувають у режимі основного елемента. Їх надійність не залежить від того, у який момент вони включились у роботу на місце основного.

Ненавантажений резерв – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у режимі ненавантаження порівняно з основним елементом. Резервні елементи перебувають у виключеному стані й за умовою до моменту їх включення в роботу на місце основного елемента не можуть відмовити.

Полегшений резерв – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у режимі меншого навантаження порівняно з основним елементом. Протягом очікування в резерві вони можуть відмовити, але з меншою ймовірністю, ніж ймовірність відмови основного елемента.

Кратність резерву – відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих ними елементів, виражене нескоротним дробом.

Дублювання – резервування, за якого до одного основного елемента додається один резервний. Це означає, що пристрої працюють паралельно, і якщо вийде з ладу один – працює інший. Ймовірність виходу з ладу двох пристроїв одночасно дуже мала і залежить від технології й культури виробництва. Прикладом дублювання можна вважати роботу шпал і скріплень.

Ремонтопридатність різко зростає (підвищується) із застосуванням модульного принципу побудови (створення) об’єкта. Модулі мають однакове кріплення, швидко замінюються. Як приклад застосування модульного принципу в колійному господарстві можна навести ланку рейко-шпальної решітки колії, яку використовують для заміни елементів верхньої будови під час проведення модернізації або капітального ремонту колії.

Показники ремонтпридатності в умовах експлуатації використовуються тільки для порівняння різних конструкцій за впливом технології їхнього відновлення на процес перевезення (збою руху поїздів).

Прикладом є відновлення ланкової колії після зламу рейки або відновлення безстикової колії за тієї самої відмови.

Окремі елементи колії (рейки, шпали, хрестовини, деталі скріплення) відновленню безпосередньо в колії не підлягають, їх надійність характеризується показниками безвідмовності (напрацюванням на відмову або параметром потоку відмов). Ці показники безпосередньо впливають на виконання колією призначених функцій, при цьому необхідно враховувати як повні, так і часткові відмови колії. Часткові відмови вимірюються в питомих величинах за кількістю (штук на 100 км) і протяжністю (у відсотках від протяжності розглянутої ділянки), а повні відмови в питомих величинах за кількістю (у штуках на 1 км або 100 км).

Основним показником надійності колії приймається показник довговічності, що значною мірою залежить і від показників безвідмовності. Ресурс рейок, елементів скріплення та інших частин колії, а також верхньої будови колії в цілому визначається пропущеним тоннажем у мільйонах тонн бруто. Термін роботи в роках використовується для складових колії, робота яких залежить від кліматичних факторів і факторів часу (шпали, прокладки).

Оцінки надійності колії тільки на якому-небудь одному кілометрі або одному перегоні, нехай навіть з найбільшою кількістю відмов, недостатньо для підсумкової оцінки впливу відмов на перевізний процес, що визначається тільки стосовно усієї поїздо-ділянки. Оскільки довжина поїздо-ділянки в різних регіонах мережі може істотно відрізнитися (від 50 до 200 км і більше), то числові значення показників надійності зручно виражати в питомих за розгорнутою довжиною головної колії величинах, тобто в середньому на одиниці протяжності (на 1, 10 або 100 км).

1.2.6. Комплексні показники

Комплексними показниками надійності є коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання.

Процес функціонування відновлюваного об'єкта можна подати як послідовність інтервалів працездатності й відновлення, що чергуються.

Коефіцієнт готовності – це ймовірність того, що об’єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу, окрім планованих періодів, протягом яких застосування об’єкта за призначенням не передбачається. Також коефіцієнт готовності можна розглядати як частку часу, протягом якого об’єкт працездатний, від загального часу роботи об’єкта $t_{\text{сл}}$.

Цей показник одночасно оцінює властивості працездатності й ремонтпридатності об’єкта.

Для одного об’єкта, що ремонтується, коефіцієнт готовності

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{t_{\text{сл}}} \int \Gamma(t) dt = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n \tau_i}. \quad (34)$$

З виразу видно, що коефіцієнт готовності об’єкта можна підвищити за рахунок збільшення напрацювання на відмову t_i і зменшення середнього часу відновлення τ_i . Для визначення коефіцієнта готовності необхідно мати достатньо тривалий календарний термін функціонування об’єкта.

Залежність коефіцієнта готовності від часу відновлення τ_i утрудняє оцінку надійності об’єкта, оскільки за K_{Γ} не можна судити про час безперервної роботи повністю. Наприклад, для одного й того самого числового значення K_{Γ} можна мати малі інтервали працездатності об’єкта t_i і великі. Таким чином можна довести, що на конкретному інтервалі працездатності ймовірність безвідмовної роботи буде більша там, де більше t_i , хоча за цим інтервалом може наставати тривалий інтервал простою. Коефіцієнт готовності є зручною характеристикою для об’єктів, які призначені для тривалого функціонування, а вирішують поставлене завдання протягом короткого проміжку часу (перебувають у режимі очікування), наприклад покілометровий запас рейок і т. ін.

Коефіцієнт оперативної готовності $K_{\text{ог}}$ визначається як ймовірність того, що об’єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу (окрім планованих періодів, протягом яких застосування об’єкта за призначенням не передбачається) і починаючи з цього моменту працюватиме безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

З визначення ймовірності випливає, що

$$K_{OG} = K_{\Gamma} P(t_p). \quad (35)$$

де K_{Γ} – коефіцієнт готовності;

$P(t_p)$ – імовірність безвідмовної роботи об'єкта, протягом часу (t_p), який потрібен для безвідмовного використання за призначенням.

Коефіцієнт технічного використання $K_{ТВ}$ дорівнює відношенню математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані, зумовленого технічним обслуговуванням і ремонтом за той самий період експлуатації:

$$K_{ТВ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i + \sum_{j=1}^k \tau_j}, \quad (36)$$

де t_i – час зберігання працездатності на i -му циклі функціонування об'єкта;

τ_i – час відновлення (ремонт) після i -ї відмови об'єкта;

τ_j – тривалість виконання j -ї профілактики, що потребує виводу об'єкта з працездатного стану (використання за призначенням);

n – кількість робочих циклів за даний період експлуатації;

m – кількість відмов (відновлень) за даний період;

k – кількість профілактик, що потребують виводу об'єкта з працездатного стану в даний період.

Як видно з виразу, коефіцієнт технічного використання характеризує частку часу перебування об'єкта в працездатному стані щодо загальної (календарної) тривалості експлуатації. Отже, $K_{ТВ}$ відрізняється від K_{Γ} тим, що в ході його визначення враховується весь час вимушених простоїв, тоді як під час визначення K_{Γ} час простою, пов'язаний з виконанням профілактичних робіт, не враховується.

Сумарний час вимушеного простою об'єкта звичайно включає час:

- на пошук і усунення відмови;
- на регулювання й настройку об'єкта після усунення відмови;
- простою через відсутність запасних елементів;
- профілактичних робіт.

У колійному господарстві передбачені планові «вікна» для виконання планових ремонтів і поточного утримання. Ці інтервали часу, так само як і інтервали, пов'язані з «вікнами» унаслідок раптової відмови, враховуються під час визначення розглянутих коефіцієнтів надійності.

Контрольні запитання та завдання

1. Поясніть терміни: «надійність», «об'єкт», «система», «елемент».
2. Назвіть основні поняття теорії надійності.
3. Як класифікуються властивості в теорії надійності?
4. Як класифікується стан об'єкта в теорії надійності?
5. Як класифікуються події в теорії надійності?
6. Як класифікуються тимчасові поняття в теорії надійності?
7. Як класифікуються види об'єктів у теорії надійності?
8. Які показники надійності існують?
9. Поясніть показники надійності: безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність, збережуваність.
10. Який стан об'єкта називається справним? Наведіть приклади.
11. Перелічіть показники збережуваності.
12. Перелічіть показники довговічності.
13. Перелічіть показники ремонтопридатності.
14. Які способи підвищення показників ремонтопридатності вам відомі?
15. Які види резервів вам відомі?
16. Поясніть термін «кратність резерву».
17. Перелічіть комплексні показники в теорії надійності.
18. У чому різниця між термінами «коефіцієнт готовності» та «коефіцієнт оперативної готовності»?
19. Для яких видів об'єктів застосовують комплексні показники надійності?

Математичні моделі для інженерних задач

2.1. Основні поняття й терміни математичного моделювання

Модель є відображенням об'єкта в певній формі, відмінній від форми його реального існування. Моделі можна поділити на матеріальні й абстрактні. Для **матеріальних моделей** самою моделлю є матеріальний об'єкт. Щоб деякий матеріальний об'єкт був моделлю, заміщенням деякого оригіналу, між ними повинне бути встановлене відношення подібності. Для цього існують різні способи:

- **пряма подібність** – отримується в результаті фізичної взаємодії в процесі створення моделі (фотографія, масштабні моделі вагонів, кораблів, будинків і т. ін.). Навіть для моделі прямої подібності існує проблема переносу результатів моделювання на оригінал (не всі показники можна змінювати відповідно до масштабів моделі, наприклад, сила тяжіння, щільність матеріалу, швидкість руху). Існує теорія подібності, яка займається вивченням таких питань;

- **непряма подібність** – встановлюється між оригіналом і моделлю не в результаті фізичної взаємодії, а існує об'єктивно в природі, виявляючись у вигляді збігу або близькості їх абстрактних моделей. Наприклад, електромеханічна аналогія. Деякі закономірності механічних і електричних процесів описуються однаковими законами і мають розбіжності тільки в різній фізичній інтерпретації показників. Тому експериментування з механічною конструкцією можна замінити на дослід з електричною схемою, що простіше й ефективніше.

- **умовна подібність** – між оригіналом і моделлю встановлюється в результаті домовленості. Наприклад, посвідчення особи – модель його власника, гроші – модель вартості, сигнали – моделі повідомлень. Моделі умовної подібності є способом матеріального втілення абстрактних моделей, формою, у якій ці абстрактні моделі

зберігаються і передаються від однієї людини іншій, при цьому залишається можливість повернення в абстрактну форму. Це досягається домовленістю про те, який стан реального об'єкта ставиться у відповідність даному елементові абстрактної моделі.

До **абстрактних, або мовних**, моделей належать мовні й математичні конструкції. Природна мова є універсальним засобом побудови будь-яких абстрактних моделей. Універсальність забезпечується можливістю введення в мову нових слів, а також можливістю ієрархічної побудови все більш розвинутих мовних моделей. Універсальність мови досягається, крім іншого, ще й тим, що мовні моделі є неоднозначними, що виявляється вже на рівні слів (багатозначність або невизначеність). До цього додається багатоваріантність з'єднання слів у фрази. Це породжує приблизність – невід'ємну властивість мовних моделей. На практиці ця приблизність перетворюється людиною природною мовою за рахунок «розуміння», «інтерпретації». Рано чи пізно необхідність у такому перетворенні набуває регулярного характеру. Це відбувається за рахунок вироблення «професійної» мови людьми, пов'язаними загальним видом діяльності. Найбільш чітко це видно на прикладі мов конкретних наук. Диференціація наук приводить до створення спеціалізованих мов – точніших, ніж природні. Тому й моделі спеціальних наук більш точні, вони містять більше інформації.

Найбільшу визначеність і точність мають моделі, які створені засобами математики, тоді маємо справу з математичною моделлю. **Математична модель** виражає істотні риси об'єкта чи процесу мовою рівнянь та інших математичних засобів. Власне, сенс самої математики полягає в тому, що вона намагається відбити, тобто промодельювати своєю специфічною мовою закономірності навколишнього світу.

Модель створюється з такою метою (або для поєднання цілей):

- щоб зрозуміти, яку будову має конкретний об'єкт, яка його структура, основні властивості, закони розвитку і взаємодії з навколишнім світом;
- щоб навчитися керувати об'єктом (чи процесом) і визначити найкращі способи керування при заданих цілях і критеріях;
- щоб прогнозувати прямі й непрямі наслідки реалізації заданих способів і форм впливу на об'єкт.

Відповідність між моделлю й дійсністю можна дослідити за такими показниками.

1. **Скінченність.** Будь-які реальні об'єкти як частина реального світу нескінченні за своїми властивостями й зв'язкам з іншими об'єктами. Усі моделі, навпаки, скінченні. Абстрактні моделі скінченні за визначенням – вони відразу наділяються фіксованою кількістю властивостей. Матеріальні моделі скінченні в тому сенсі, що з нескінченної множини їх властивостей вибираються й використовуються лише деякі, які цікавлять нас у об'єкті-оригіналі для розв'язання поставленого завдання. Таким чином, модель подібна оригіналу в скінченній кількості відношень.

2. **Спрощеність.** Скінченність моделей робить неминучою їх спрощеність, але на практиці ця спрощеність є припустимою, тому що для будь-якої мети виявляється достатнім неповне, спрощене відображення дійсності. Для конкретних цілей таке спрощення є і необхідним, тому що дозволяє виявити головні ефекти і властивості оригіналу. Ще один аспект: із двох моделей, що описують з однаковою точністю деякий об'єкт, ближчою до оригіналу (до його природи) виявляється та, що простіша.

3. **Наближеність моделей.** З цим терміном пов'язується кількісне розходження моделі й оригіналу (якісні розходження відбивають терміни скінченність і спрощеність). Це кількісне розходження є завжди і саме по собі не є ні великим, ні малим, його міра вводиться співвіднесенням цього розходження з метою моделювання.

4. **Адекватність.** Адекватна та модель, за допомогою якої успішно досягається поставлена мета. Це не рівнозначно поняттю повноти, правильності й точності моделі. Наприклад, модель Птолемея адекватна (стосовно точності опису руху планет). Іноді вдається ввести певну міру адекватності. Тоді можна розглядати питання про ідентифікацію моделі, тобто вибір з декількох моделей найбільш адекватної.

5. **Істинність.** Істинність моделі виявляється в практичному співвідношенні її з оригіналом, при цьому важлива роль умов, у яких ведеться порівняння (з погляду діалектичного матеріалізму наближення відносної істини до істини абсолютної). Наприклад, хвильова й корпускулярна моделі світла.

2.2. Однофакторний дисперсійний аналіз

Будь-який інженерний розрахунок пов'язаний з моделюванням того чи іншого об'єкта або процесу. На більшість характеристик, які використовуються в розрахунках, впливає безліч випадкових факторів, що не дозволяють одержувати бажаний детермінований показник. Це приводить до необхідності аналізувати ситуацію в середньому, з імовірною оцінкою очікуваного значення. Для цього використовуються різні методи математичної статистики. Одним з них є дисперсійний аналіз.

Дисперсійний аналіз – це статистичний метод аналізу результатів спостережень, призначений для вибору з різних, одночасно діючих факторів найбільш важливих і оцінки їх впливу [10].

Дисперсійний аналіз використовується в різних галузях науки і техніки, у тому числі й пов'язаних із залізничним транспортом. Відкриття дисперсійного аналізу, як і сам термін «дисперсія», належать Р. Фішеру. Сутність аналізу полягає в розкладанні загальної варіації випадкової величини на незалежні складові, кожна з яких характеризує вплив того чи іншого фактора або їх взаємодії.

Факторами називають зовнішні умови, які впливають на експеримент. Наприклад, сила, що діє на рейку, якщо досліджувати напруження в рейках. В умовах експерименту фактори змінюють свої значення, тобто мають різні рівні, завдяки чому можна досліджувати вплив конкретного фактора. У такому випадку говорять, що фактор варіює на різних рівнях або має декілька рівнів.

Залежність від кількості факторів, що включені до аналізу, розрізняють класифікацію за однією ознакою – **однофакторний** аналіз, та за декількома ознаками – **багатофакторний** аналіз.

Однофакторний аналіз дозволяє чисельно оцінити вплив вибраного фактора на дослідну величину. Для цього всі спостереження повинні бути подані у вигляді таблиці – **матриці спостережень** (табл. 2.1).

Матриця спостережень

Спостереження	Рівні фактора					
	1	2	...	j	...	p
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1j}	...	X_{1p}
2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2j}	...	X_{2p}
...
i	X_{i1}	X_{i2}	...	X_{ij}	...	X_{ip}
...
q_j	$X_{q_1 1}$	$X_{q_2 2}$...	$X_{q_j j}$...	$X_{q_p p}$

Примітка. j – номер рівня фактора; p – кількість рівнів фактора; i – номер спостереження; q_j – кількість спостережень для j -го рівня фактора (рівні фактора можуть мати різну кількість спостережень); X_{ij} – значення досліджуваної величини, яке отримане під час i -го спостереження для j -го фактора.

Середнє арифметичне всієї сукупності спостережень

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{q_j} X_{ij}, \quad (37)$$

де n – загальна кількість спостережень, $n = \sum_{j=1}^p q_j$.

Середнє арифметичне спостережень j -го рівня

$$\bar{X}_j = \frac{1}{q_j} \sum_{i=1}^{q_j} X_{ij}. \quad (38)$$

Факторне розсіювання, тобто розсіювання значень спостережуваної величини, викликане зміною рівня фактора, визначається за формулою

$$Q_{\Phi} = \sum_{j=1}^p \left[q_j (\bar{X} - \bar{X}_j)^2 \right]. \quad (39)$$

Залишкове розсіювання – розсіювання за рахунок неврахованих факторів, характеризує розходження в спостереженнях для одного рівня:

$$Q_{\text{зал}} = \sum_{j=1}^p Q_{\text{зал } j}, \quad (40)$$

$$Q_{\text{зал } j} = \sum_{i=1}^{q_j} (\bar{X}_j - X_{ij})^2. \quad (41)$$

Як контроль виконання розрахунків можна визначити загальне розсіювання

$$Q = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{q_j} (\bar{X} - X_{ij})^2, \quad (42)$$

яке повинно дорівнювати сумі факторного й залишкового розсіювань:

$$Q = Q_{\phi} + Q_{\text{зал}}. \quad (43)$$

Факторна σ_{ϕ} і залишкова $\sigma_{\text{зал}}$ дисперсії становлять

$$\sigma_{\phi} = \frac{Q_{\phi}}{k_1}, \quad (44)$$

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{Q_{\text{зал}}}{k_2}, \quad (45)$$

де k_1 і k_2 – степені вільності,

$$k_1 = p - 1, \quad (46)$$

$$k_2 = n - p. \quad (47)$$

Оцінкою ступеня впливу досліджуваного фактора на спостережувану величину є критерій F

$$F = \sigma_{\phi} / \sigma_{\text{зал}}. \quad (48)$$

Чим більше значення критерію F , тим сильнішим є вплив досліджуваного фактора.

Відповідно до рівня значущості α та степенів вільності k_1 і k_2 існує таке критичне значення $F_{кр} = f(\alpha, k_1, k_2)$ (табл. 2.2), що за виконання умови $F < F_{кр}$ досліджуваний фактор взагалі не впливає на спостережувану величину [3].

Таблиця 2.2

$F_{кр}$ - розподіл для рівня значущості $\alpha = 0,05$ та степенів вільності k_1 і k_2

k_2	k_1								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,97
11	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,86
12	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,92	2,85	2,80	2,76
14	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,77	2,70	2,65	2,60
16	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
20	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,52	2,45	2,40	2,35
24	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,43	2,36	2,30	2,26
30	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,34	2,27	2,21	2,16

Чим більша кількість рівнів, на які розбивається фактор, та більша кількість спостережень, тим більше можна довіряти отриманим результатам і відповідно тим менше значення $F_{кр}$. У разі розділення фактора на безліч рівнів та виконанні безлічі спостережень для кожного з них будемо мати $F_{кр} = 1$.

Розглянемо практичне використання дисперсійного аналізу на конкретному прикладі. Нехай задані результати спостережень за поодинокими відмовами рейок за деякий термін на двадцяти ділянках залізничної колії. Для кожної ділянки відомі вантажонапруженість, радіус кривої і середня швидкість руху. На основі наведених даних необхідно визначити, який із цих факторів найбільше впливає на поодинокий вихід рейок. Вихідні дані для прикладу розрахунку наведені в табл. 2.3.

Вихідні дані для прикладу розрахунку

Поодинокий вихід рейок, шт.	Вантажна напруженість G , млн т·км/км бр. рік	Радіус кривої R , м	Швидкість руху V , км/год
3	10	1 545	85
15	30	788	116
4	5	1 387	67
19	49	638	110
14	25	1 269	100
1	2	3	4
10	15	880	94
18	39	1 264	132
9	15	1 361	75
9	12	1 317	64
2	11	1 703	71
5	10	1 809	59
14	25	938	117
10	15	880	94
18	39	1 264	132
9	15	1 361	75
9	12	1 317	64
2	11	1 703	71
5	10	1 809	59
14	25	938	117
10	15	1 799	95
12	20	1 281	80
2	10	1 864	72
8	11	1 270	88
11	23	940	107
9	18	1 132	66
8	11	1 644	66
13	28	1 076	97

Таким чином, маємо спостережувану величину – поодинокий вихід рейок, та три фактори, дія яких оцінюється, – вантажонапруженість, радіус кривої й середня швидкість руху. Для розв’язання задачі виконаємо дисперсійний аналіз окремо для кожного з досліджуваних факторів, визначимо ступені їх впливу за критерієм F і порівняємо між собою.

Аналіз впливу вантажонапруженості. Виходячи з даних табл. 2.3 маємо, що найменше значення фактора становить 5 млн т·км/км бр. рік, а найбільше – 49 млн т·км/км бр. рік. Розділимо значення фактора на чотири рівні:

1-й рівень – $\Gamma = 5 \dots 15$ млн т·км/км бр. рік;

2-й рівень – $\Gamma = 16 \dots 26$ млн т·км/км бр. рік;

3-й рівень – $\Gamma = 27 \dots 37$ млн т·км/км бр. рік;

4-й рівень – $\Gamma = 38 \dots 49$ млн т·км/км бр. рік.

Складемо таблицю спостережень (див. табл. 2.1). Для цього відсортуємо дані спостережень за поодиноким виходом рейок відповідно до рівнів фактора (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Матриця спостережень для вантажонапруженості, млн т·км/км бр. рік

Спостереження	Рівні фактора			
	1	2	3	4
	$\Gamma = 5 \dots 15$	$\Gamma = 16 \dots 26$	$\Gamma = 27 \dots 37$	$\Gamma = 38 \dots 49$
1	3	14	15	19
2	4	14	13	18
3	10	12		
4	9	11		
5	9	9		
6	2			
7	5			
8	10			
9	2			
10	8			
11	8			

Середнє арифметичне значення всієї сукупності спостережень за формулою (37) $\bar{X} = 9,75$; середні арифметичні значення спостережень для кожного рівня за формулою (38) $\bar{X}_1 = 6,36$; $\bar{X}_2 = 12,0$; $\bar{X}_3 = 14,0$; $\bar{X}_4 = 18,5$.

Згідно з табл. 2.4, кількість спостережень для відповідного рівня фактора становитиме: $q_1 = 11$; $q_2 = 5$; $q_3 = 2$; $q_4 = 2$.

За формулою (3) знаходимо факторне розсіювання

$$Q_{\phi} = 11 \cdot (9,75 - 6,36)^2 + 5 \cdot (9,75 - 12,0)^2 + 2 \cdot (9,75 - 14,0)^2 + 2 \cdot (9,75 - 18,5)^2 = 340,98.$$

За формулами (40) і (41) обчислимо залишкове розсіювання – спочатку для кожного рівня фактора, а потім загальне

$$Q_{\text{зал}1} = (6,36 - 3)^2 + (6,36 - 4)^2 + (6,36 - 10)^2 + (6,36 - 9)^2 + (6,36 - 9)^2 + (6,36 - 2)^2 + (6,36 - 5)^2 + (6,36 - 10)^2 + (6,36 - 2)^2 + (6,36 - 8)^2 + (6,36 - 8)^2 = 102,55;$$

$$Q_{\text{зал}2} = (12 - 14)^2 + (12 - 14)^2 + (12 - 12)^2 + (12 - 11)^2 + (12 - 9)^2 = 18;$$

$$Q_{\text{зал}3} = (14 - 15)^2 + (14 - 13)^2 = 2;$$

$$Q_{\text{зал}4} = (18,5 - 19)^2 + (18,5 - 18)^2 = 0,5;$$

$$Q_{\text{зал}} = 94,9 + 18 + 2 + 0,5 = 123,05.$$

Загальна кількість спостережень $n = 20$, кількість рівнів фактора $p = 4$, за формулами (46) і (47) степені вільності $k_1 = 3$; $k_2 = 16$.

За формулами (44), (45) знайдемо факторну й залишкову дисперсії

$$\sigma_{\phi} = \frac{340,98}{3} = 113,66; \quad \sigma_{\text{зал}} = \frac{123,05}{16} = 7,69.$$

Значення критерію F знайдемо за формулою (48):

$$F = \frac{113,66}{7,69} = 14,78.$$

Для степенів вільності $k_1 = 3$ і $k_2 = 16$ критичне значення критерію за табл. 2.2 становить $F_{кр} = 3,24$. Виходячи з того що $F = 14,78 > F_{кр} = 3,24$, можна зробити висновок, що для розглянутих вихідних даних вантажонапруженість суттєво впливає на поодинокий вихід рейок.

Аналіз впливу радіуса кривої виконується аналогічно попередньому розрахунку. Подамо його у вигляді таблиць (табл. 2.5 і 2.6).

Умова $F > F_{кр}$ виконується. Таким чином, для розглянутих вихідних даних радіус кривої впливає на поодинокий вихід рейок, але значно менше, ніж вантажонапруженість.

Аналіз впливу швидкості руху подано в табл. 2.7 і 2.8.

Умова $F > F_{кр}$ виконується. Таким чином, для розглянутих вихідних даних швидкість руху впливає на поодинокий вихід рейок.

Таблиця 2.5

Матриця спостережень для радіуса кривої, м

Спостереження	Рівні фактора			
	1	2	3	4
	$R = 631 \dots 940$	$R = 941 \dots 1\ 250$	$R = 1\ 251 \dots 1\ 560$	$R = 1\ 561 \dots 1\ 870$
1	15	9	3	2
2	19	13	4	5
3	10		14	10
4	14		18	2
5	11		9	8
6			9	
7			12	
8			8	

Таблиця 2.6

Виконання розрахунків для радіуса кривої

Спостереження	Рівні фактора			
	1	2	3	4
\bar{X}	9,75			
\bar{X}_j	13,8	11,0	9,63	5,4
q_j	5	2	8	5
Q_ϕ	179,87			
$Q_{\text{зал } j}$	50,80	8,00	173,88	51,2
$Q_{\text{зал}}$	283,88			
k_1	3			
k_2	16			
q_ϕ	59,96			
$\sigma_{\text{зал}}$	17,74			
F	3,38			
$F_{\text{кр}}$	3,24			

Таблиця 2.7

Матриця спостережень для швидкості руху, км/год

Спостереження	Рівні фактора			
	1	2	3	4
	$V = 64 \dots 80$	$V = 81 \dots 97$	$V = 98 \dots 114$	$V = 115 \dots 132$
1	4	3	19	15
2	9	10	14	18
3	9	10	11	14
4	2	12		
5	5	8		

Спостереження	Рівні фактора			
	1	2	3	4
	$V = 64 \dots 80$	$V = 81 \dots 97$	$V = 98 \dots 114$	$V = 115 \dots 132$
6	2	13		
7	9			
8	8			

Таблиця 2.8

Виконання розрахунків для швидкості руху

Спостереження	Рівні фактора			
	1	2	3	4
\bar{X}	9,75			
\bar{X}_j	6,0	9,33	14,67	15,67
q_j	8	6	3	3
Q_ϕ	291,32			
$Q_{\text{зал } j}$	68,0	63,33	32,67	8,67
$Q_{\text{зал}}$	172,67			
k_1	3			
k_2	16			
q_ϕ	97,11			
$\sigma_{\text{зал}}$	10,79			
F	9,00			
$F_{\text{кр}}$	3,24			

Порівнюючи ступені впливу трьох розглянутих факторів, можна зробити висновок, що в розглянутому випадку найбільший вплив на поодинокий вихід рейок має вантажонапруженість.

2.3. Двофакторний дисперсійний аналіз

Якщо на досліджувану величину впливає декілька факторів, то необхідно враховувати взаємодію між ними. Наприклад, нерівність на колесі та нерівність на колії впливають на силу взаємодії колеса і рейки. Одночасний збіг обох нерівностей приведе до суттєвого зростання сили взаємодії. Таким чином, для розгляду такого процесу потрібно визначати вплив як самих факторів, так і їхньої взаємодії.

Розглянемо задачу оцінки впливу двох одночасно діючих факторів. Для такого випадку матриця спостережень подана в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Матриця спостережень для двофакторного дисперсійного аналізу

Рівні фактора B	Рівні фактора A			
	$j = 1$	$j = 2$...	$j = p$
$k = 1$				
$k = 2$				
...				
$k = r$			$\boxed{\bar{X}_{kj}}$ $X_{kj1}, X_{kj2}, \dots, X_{kji}, \dots, X_{kjq_{kj}}$	

У кожен клітинку табл. 2.9 записується набір спостережень $X_{kj1}, X_{kj2}, \dots, X_{kji}, \dots, X_{kjq_{kj}}$, що відповідають k -му рівню фактора B і j -му рівню фактора A . Таким чином, q_{kj} – кількість, а \bar{X}_{kj} – середнє значення спостережень для клітинки

$$\bar{X}_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^{q_{kj}} X_{kji}}{q_{kj}}. \quad (49)$$

Середні значення спостережуваної величини для кожного рядка і стовпця

$$\bar{X}_k = \frac{\sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^{q_{kj}} X_{kji}}{\sum_{k=1}^r q_{kj}}, \quad (50)$$

$$\bar{X}_j = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{q_{kj}} X_{kji}}{\sum_{j=1}^p q_{kj}}. \quad (51)$$

Загальне середнє значення для всієї матриці спостережень

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^{q_{kj}} X_{kji}}{n}, \quad (52)$$

де n – загальна кількість спостережень у матриці,

$$n = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^r q_{kj}. \quad (53)$$

Розсіювання, викликане впливом фактора A ,

$$Q_A = \sum_{j=1}^p \left[(\bar{X}_j - \bar{X})^2 \sum_{k=1}^r q_{kj} \right]. \quad (54)$$

Розсіювання, викликане впливом фактора B ,

$$Q_B = \sum_{k=1}^r \left[(\bar{X}_k - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^p q_{kj} \right]. \quad (55)$$

Розсіювання, викликане взаємною дією обох факторів,

$$Q_{AB} = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^r \left[(\bar{X}_{kj} - \bar{X}_k - \bar{X}_j + \bar{X})^2 q_{kj} \right]. \quad (56)$$

Залишкове розсіювання, викликане факторами, які не враховані,

$$Q_{\text{зал}} = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^{q_{kj}} (X_{kji} - \bar{X})^2. \quad (57)$$

Відповідні дисперсії

$$\sigma_A = \frac{Q_A}{k_1}; \quad (58)$$

$$\sigma_B = \frac{Q_B}{k_2}; \quad (59)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{Q_{AB}}{k_3}; \quad (60)$$

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{Q_{\text{зал}}}{k_4}, \quad (61)$$

де $k_1 \dots k_4$ – відповідні степені вільності:

$$k_1 = p - 1; \quad (62)$$

$$k_2 = r - 1; \quad (63)$$

$$k_3 = (p - 1)(r - 1); \quad (64)$$

$$k_4 = n - rp. \quad (65)$$

Критерій для оцінки впливу фактора A

$$F_A = \frac{\sigma_A}{\sigma_{\text{зал}}}, \quad (66)$$

Критичне значення критерію визначається за табл. 2.2:

$$F_{\text{кр } A} = f(\alpha, k_1, k_4). \quad (67)$$

Критерій для оцінки впливу фактора B

$$F_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\text{зал}}}, \quad (68)$$

$$F_{\text{кр } B} = f(\alpha, k_2, k_4). \quad (69)$$

Критерій для оцінки взаємодії факторів

$$F_{AB} = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_{\text{зал}}}, \quad (70)$$

$$F_{\text{кр } AB} = f(\alpha, k_3, k_4). \quad (71)$$

Порівнюючи отримані значення критеріїв з критичними та між собою, можна зробити висновок про ступені впливу розглянутих факторів і про наявність та значущість взаємодії між ними.

2.4. Апроксимація результатів спостережень математичними функціями

Результати спостережень, залежності однієї величини від іншої (наприклад, напружень у рейках від сили, що діє на них, або відмова рейок від вантажонапруженості), які подані як пара координат $(x; y)$, можна апроксимувати тією чи іншою математичною функцією. Тобто можна знайти таке математичне рівняння $y = f(x)$, використовуючи яке будемо отримувати приблизно ті самі значення y відносно x , що й за результатами спостережень.

Наприклад, на рис. 1 показана пряма, яка апроксимує положення декількох точок. Зазвичай, як критерій такої апроксимації, тобто оптимальності підбору виду функції та її параметрів (у цьому прикладі параметри – це величини a і b), розглядається різниця між координатою точки, що отримана за спостереженнями, та координатою, що обчислена за рівнянням апроксимуючої функції (Δ_i).

Апроксимація прямою. Пряма може бути задана рівнянням

$$y = ax + b, \quad (72)$$

де a і b – постійні параметри.

Тоді задача апроксимації буде полягати в знаходженні таких параметрів a і b , за яких виконується умова

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 = \min, \quad (73)$$

де n – кількість точок з вимірними координатами;
 x_i і y_i – вимірні координати i -ї точки.

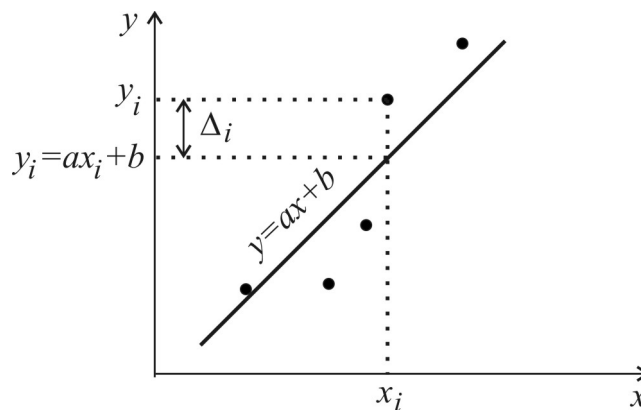


Рис. 1. Апроксимація набору точок прямою

Використання такого критерію для знаходження параметрів апроксимуючої функції ще називають методом найменших квадратів.

Для знаходження параметрів функції, за яких вона має мінімум, необхідно першу похідну прирівняти до нуля. Зважаючи на те що мінімум функції залежить від двох параметрів, потрібно скласти два рівняння з частинними похідними

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 = 0, \end{cases} \quad (74)$$

або

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-x_i) = 0, \\ \sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i - b)(-1) = 0, \end{cases} \quad (75)$$

а в остаточному вигляді

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (76)$$

Тепер коефіцієнти a і b можна отримати, розв'язавши систему двох лінійних рівнянь з двома невідомими.

Апроксимація параболою. Парабола може бути задана рівнянням

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (77)$$

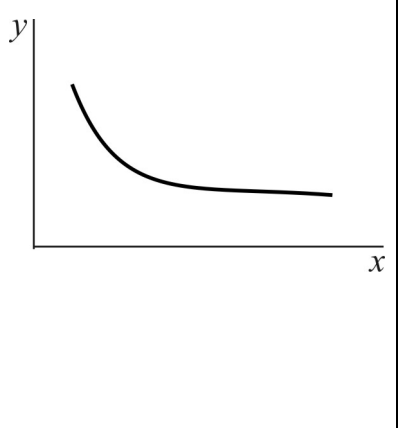
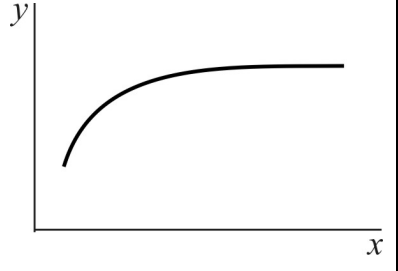
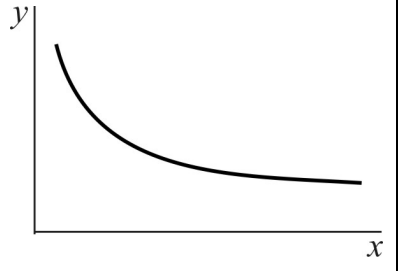
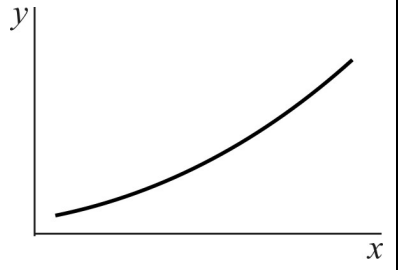
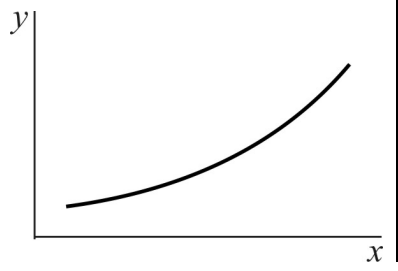
де a , b і c – постійні параметри.

Якщо для знаходження параметрів параболі використовувати метод найменших квадратів, то хід міркування аналогічний формулам (73), (74) з поправкою на наявність трьох параметрів. В остаточному вигляді параметри параболі можуть бути знайдені із системи рівнянь

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^4 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i + cn = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (78)$$

Апроксимація іншими функціями. Взагалі може бути задано будь-яке рівняння з кількома параметрами, які можна знайти за методом найменших квадратів аналогічно розглянутим функціям. У табл. 2.10 наведено декілька видів функцій, зображення їх графіків та формули для розрахунку параметрів.

Вирази для апроксимації даних математичними функціями

Функція	Графік	Формули для визначення параметрів
$y = a + \frac{b}{x}$		$a = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_i}\right)^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i}}{n \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}\right)^2},$ $b = \frac{n \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}\right)^2}$
$y = \frac{x}{a + bx}$		$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i} - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i}}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{y_i} - a \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$
$y = \frac{1}{a + bx}$		$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i}}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i} - a \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$
$y = x^a$		$a = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg x_i \lg y_i)}{\sum_{i=1}^n (\lg x_i)^2}$
$y = a^x$		$\lg a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \lg y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$

Наводячи приклад факторного дисперсійного аналізу за вихідними даними табл. 2.3, було встановлено, що в даному випадку на відмову рейок найбільший вплив має вантажонапруженість. На прикладі тих самих даних апроксимуємо залежність поодинокого виходу рейок від вантажонапруженості прямою й параболою.

Приклад апроксимації прямою. Вихідними даними є перший та другий стовпці табл. 2.3. Для знаходження рівняння прямої (див. (72)) необхідно скласти систему рівнянь за формулою (76). Розрахунок складових, які входять до системи рівнянь, наведено в табл. 2.11.

Таблиця 2.11

Розрахунок складових системи рівнянь для апроксимації прямою

y_i	x_i	x_i^2	$x_i y_i$
3	10	100	30
15	30	900	450
4	5	25	20
19	49	2 401	931
14	25	625	350
10	15	225	150
18	39	1 521	702
9	15	225	135
9	12	144	108
2	11	121	22
5	10	100	50
14	25	625	350
10	15	225	150
12	20	400	240
2	10	100	20
8	11	121	88
11	23	529	253
9	18	324	162

y_i	x_i	x_i^2	$x_i y_i$
8	11	121	88
13	28	784	364
$\sum_{i=1}^n y_i = 195$	$\sum_{i=1}^n x_i = 382$	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 9\,616$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i = 4\,663$

Отримавши результати розрахунків (див. табл. 2.11), система рівнянь (76) набуде вигляду

$$\begin{cases} a \cdot 9\,616 + b \cdot 382 = 4\,663, \\ a \cdot 382 + b \cdot 20 = 195. \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримаємо значення параметрів a і b : $a = 0,405$; $b = 2,015$.

Таким чином, рівняння прямої, яка апроксимує розглянуті вихідні дані, є

$$y = 0,405x + 2,015. \quad (79)$$

Приклад апроксимації параболою. Для знаходження рівняння параболі (див. вираз (15)) складемо систему рівнянь за формулою (78). Розрахунок складових, які входять до системи рівнянь, наведено в табл. 2.12.

Для прикладу, що розглядається, система рівнянь за формулою (78) матиме вигляд

$$\begin{cases} a \cdot 11\,076\,124 + b \cdot 302\,140 + c \cdot 9\,616 = 138\,823, \\ a \cdot 302\,140 + b \cdot 9\,616 + c \cdot 382 = 4\,663, \\ a \cdot 9\,616 + b \cdot 382 + c \cdot 20 = 195. \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримаємо параметри параболі $a = -0,007$; $b = 0,762$; $c = -1,44$.

Рівняння параболі, що апроксимує розглянуті вихідні дані, є

$$y = -0,007x^2 + 0,762x - 1,44. \quad (80)$$

Таблиця 2.12

Розрахунок складових системи рівнянь для апроксимації параболою

y_i	x_i	x_i^4	x_i^3	x_i^2	$x_i^2 y_i$	$x_i y_i$
3	10	10 000	1 000	100	300	30
15	30	810 000	27 000	900	13 500	450
4	5	625	125	25	100	20
19	49	5 764 801	117 649	2 401	45 619	931
14	25	390 625	15 625	625	8 750	350
10	15	50 625	3 375	225	2 250	150
18	39	2 313 441	59 319	1 521	27 378	702
9	15	50 625	3 375	225	2 025	135
9	12	20 736	1 728	144	1 296	108
2	11	14 641	1 331	121	242	22
5	10	10 000	1 000	100	500	50
14	25	390 625	15 625	625	8 750	350
10	15	50 625	3 375	225	2 250	150
12	20	160 000	8 000	400	4 800	240
2	10	10 000	1 000	100	200	20
8	11	14 641	1 331	121	968	88
11	23	279 841	12 167	529	5 819	253
9	18	104 976	5 832	324	2 916	162
8	11	14 641	1 331	121	968	88
13	28	614 656	21 952	784	10 192	364
$\sum_{i=1}^n y_i =$ = 195	$\sum_{i=1}^n x_i =$ = 382	$\sum_{i=1}^n x_i^4 =$ = 11 076 124	$\sum_{i=1}^n x_i^3 =$ = 302 140	$\sum_{i=1}^n x_i^2 =$ = 9 616	$\sum_{i=1}^n x_i^2 y_i =$ = 138 823	$\sum_{i=1}^n x_i y_i =$ = 4 663

Для перевірки отриманих результатів, а також для порівняння двох варіантів апроксимації, розрахуємо поодинокий вихід рейок стосовно даних значень вантажонапруженості за отриманими

формулами прямої і параболи. Позначимо через y^* результати розрахунку для прямої, отримані за формулою (79), і y_i^{**} – результати розрахунку для параболи за формулою (80). Як критерій апроксимації розглянемо суму квадратів різниць між вихідними даними та обчисленими за формулами прямої й параболи:

$$(\Delta^*)^2 = \sum_{i=1}^n (y - y^*)^2, \quad (81)$$

$$(\Delta^{**})^2 = \sum_{i=1}^n (y - y^{**})^2. \quad (82)$$

Приклад такого порівняння наведено в табл. 2.13.
Графічно результат апроксимації показано на рис. 2.

Таблиця 2.13

Порівняння апроксимації прямою й параболою

y_i	x_i	y_i^*	$(\Delta_i^*)^2$	y_i^{**}	$(\Delta_i^{**})^2$
3	10	6,065	9,394	5,480	6,150
15	30	14,165	0,697	15,120	0,014
4	5	4,040	0,002	2,195	3,258
19	49	21,860	8,180	19,091	0,008
14	25	12,140	3,460	13,235	0,585
10	15	8,090	3,648	8,415	2,512
18	39	17,810	0,036	17,631	0,136
9	15	8,090	0,828	8,415	0,342
9	12	6,875	4,516	6,696	5,308
2	11	6,470	19,981	6,095	16,769
5	10	6,065	1,134	5,480	0,230
14	25	12,140	3,460	13,235	0,585
10	15	8,090	3,648	8,415	2,512

y_i	x_i	y_i^*	$(\Delta_i^*)^2$	y_i^{**}	$(\Delta_i^{**})^2$
12	20	10,115	3,553	11,000	1,000
2	10	6,065	16,524	5,480	12,110
8	11	6,470	2,341	6,095	3,629
11	23	11,330	0,109	12,383	1,913
9	18	9,305	0,093	10,008	1,016
8	11	6,470	2,341	6,095	3,629
13	28	13,355	0,126	14,408	1,982
			$\sum_{i=1}^n (\Delta_i^*)^2 =$		
			$= 84,070$		
				$\sum_{i=1}^n (\Delta_i^{**})^2 =$	
				$= 63,692$	

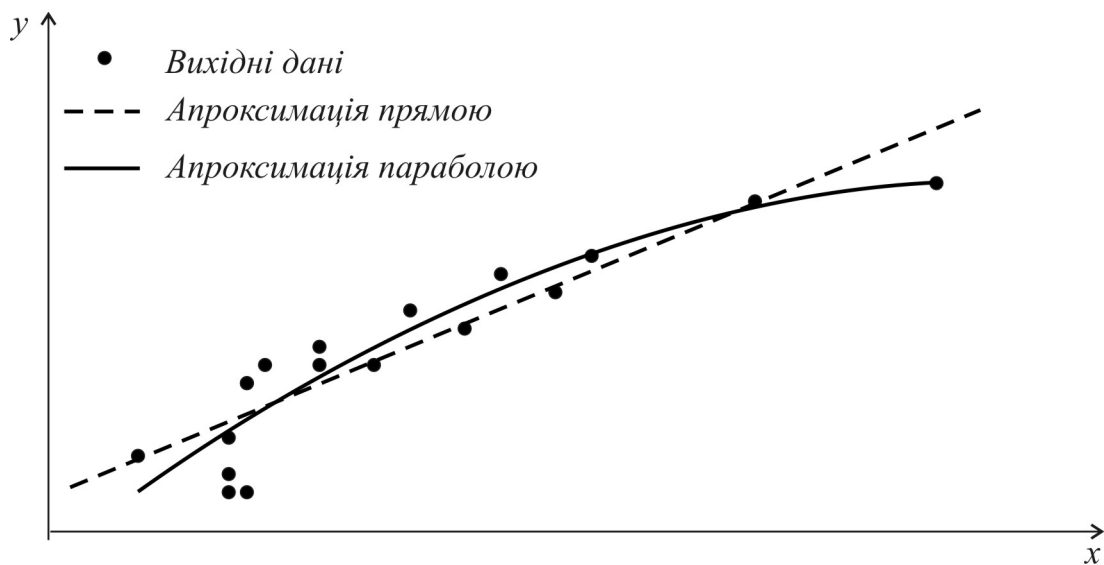


Рис. 2. Апроксимація прямою і параболою

За результатами розрахунків встановлено, що сума квадратів різниць між вихідними даними й обчисленими за рівняннями, отриманими апроксимацією, для параболі менша, ніж для прямої. Таким чином, у даному випадку парабола точніше описує положення заданого набору точок.

Контрольні запитання та завдання

1. У чому різниця між матеріальними й абстрактними моделями?
2. Для розв'язання яких задач використовуються математичні моделі?
3. Що таке скінченність моделі?
4. Яка різниця між спрощеністю й наближеністю моделі?
5. Яка різниця між адекватністю та істинністю моделі?
6. Для розв'язання яких задач використовується дисперсійний аналіз?
7. Як визначаються степені вільності матриці спостережень?
8. У якому випадку можна зробити висновок, що фактор впливає на досліджувану величину?
9. Яку додаткову інформацію можна отримати за результатами двофакторного дисперсійного аналізу порівняно з однофакторним?
10. Для розв'язання яких задач використовується апроксимація статичних спостережень математичною функцією?
11. Як можна порівняти результати апроксимації різними математичними функціями?

Моделі відмов елементів у експлуатації

3.1. Система збору та обробки інформації щодо надійності

Найбільш об'єктивні відомості про надійність виробів можна отримати на основі використання статистичних даних про відмови, що отримані в процесі експлуатації. Без інформації про відмови неможливо визначити показники надійності, виявити недоліки в конструкції колії та її утриманні, встановити вплив на надійність умов експлуатації та на цьому підґрунті вжити заходів щодо подальшого підвищення надійності колії.

Після укладання в колію дослідних конструкцій організують нагляд за їх експлуатацією та накопиченням відмов.

У більшості випадків неможливо отримати відомості про всі елементи, що утворюють **генеральну сукупність** – сукупність значень ознак усіх N_T об'єктів даного типу, тому використовують випадкову **вибірку** N_0 , тобто частину генеральної сукупності, що складається з елементів, які обрані випадковим чином з усіх однотипних елементів, що лежать у колії даної мережі, залізниці, дистанції. Чим більше $N_0 \rightarrow N_T$, тим більш обґрунтоване судження можна зробити на основі вибірки стосовно генеральної сукупності. Вибірка дає найповнішу інформацію про генеральну сукупність тільки в тому випадку, коли результати обстежень, що утворюють вибірку, є незалежними. Вибірка обов'язково повинна бути **репрезентативною**, тобто такою, у якій усі основні ознаки генеральної сукупності, з якої отримана дана вибірка, представлені приблизно в тій самій пропорції або з тією самою частотою, з якою дана ознака трапляється в цій генеральній сукупності.

Таким чином, метод використання вибірки полягає в тому, що з генеральної сукупності береться вибірка обсягом $N_0 \ll N_T$ і визначаються показники, які приймаються як наближені значення відповідних характеристик генеральної сукупності. Ступінь наближення результатів спостережень до реальних значень визначають обсягом вибірки N_0 та оцінюють відносною похибкою δ та надійною ймовірністю β величин, що розглядаються. Відносна похибка δ характеризує ступінь точності визначення середнього значення. Її розраховують як

$$\delta = \frac{t_B - T_{\text{сер}}}{T_{\text{сер}}} = \frac{|t_H - T_{\text{сер}}|}{T_{\text{сер}}}, \quad (83)$$

де t_B – верхня одностороння надійна межа;

$T_{\text{сер}}$ – середнє значення величини параметра (наприклад, напрацювання), що розглядається;

t_H – нижня одностороння надійна межа.

Якщо встановлюють діапазон $t_B \dots t_H$, то не можна виключати отримання результату, що перебуває за межами цього діапазону. Тому також вказують і ймовірність отримання результату в зазначених межах β . Розрізняють односторонні та двосторонні надійні ймовірності.

Для односторонньої ймовірності

$$\left. \begin{aligned} \beta_H &= P(T_{\text{сер}} \geq t_H), \\ \beta_B &= P(T_{\text{сер}} \leq t_B). \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

Для двосторонньої ймовірності

$$\beta = P(t_H \leq T_{\text{сер}} \leq t_B). \quad (85)$$

Для розв'язання практичних інженерних задач використовують $\beta = 0,8 \dots 0,9$, якщо раптова відмова елемента не має тяжких наслідків (людські жертви, суттєві матеріальні витрати на усунення відмови або змушеного простою поїздів), та $\beta = 0,91 \dots 0,99$, якщо відмова може мати вказані наслідки.

Порядок визначення обсягу вибірки N_0 , якщо закон розподілу відмов відомий, такий (докладніше закони розподілу будуть розглянуті далі):

1) задають відносну похибку δ середнього значення з надійною ймовірністю β ;

2) задають очікуване значення коефіцієнта варіації v (чим менше коефіцієнт варіації, тим більша щільність розташування біля нього отриманих значень та менше розсіювання, тому отримані результати для N_0 можуть бути перенесені на обсяг N_r . Значення коефіцієнта варіації v можна визначити за [5]);

3) визначають відношення δ/v ;

4) за отриманим значенням та обраною надійною ймовірністю встановлюють N_0 (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Значення δ/v залежно від обсягу вибірки

N_0	β				N_0	β			
	0,80	0,90	0,95	0,99		0,80	0,90	0,95	0,99
5	0,421	0,686	0,953	1,676	21	0,188	0,289	0,376	0,552
7	0,342	0,544	0,734	1,188	23	0,179	0,275	0,358	0,523
9	0,296	0,466	0,620	0,965	25	0,171	0,264	0,342	0,498
11	0,265	0,414	0,546	0,833	27	0,165	0,253	0,328	0,477
13	0,242	0,376	0,494	0,744	29	0,159	0,244	0,316	0,458
15	0,224	0,347	0,455	0,678	31	0,153	0,235	0,305	0,441
17	0,210	0,324	0,423	0,626	41	0,133	0,203	0,263	0,378
19	0,198	0,305	0,398	0,585	61	0,109	0,166	0,214	0,306

Якщо закон розподілу відмов невідомий, то мінімальну кількість об'єктів нагляду визначають так:

1) задають встановлену в нормативній документації мінімальну величину ймовірності безвідмовної роботи елемента $P(t)$ протягом деякого напрацювання t ;

2) задають надійну ймовірність β ;

3) знаходять обсяг вибірки як

$$N_0 = \frac{\ln(1-\beta)}{\ln P(t)}. \quad (86)$$

У первинній документації, де фіксуються результати наглядів за надійністю, містяться дані, у яких важко визначити будь-яку закономірність. Обробка цих даних починається зі складання таблиці, у якій вони розміщуються в порядку збільшення напрацювання. Для цього:

1) визначають діапазон напрацювання R , всередині якого були відмови:

$$R = T_{\max} - T_{\min}, \quad (87)$$

де T_{\max} – максимальне значення напрацювання, за якого відбулася остання відмова;

T_{\min} – мінімальне значення напрацювання, за якого відбулася перша відмова;

2) поділяють діапазон R на інтервали Δt , всередині яких групують усю сукупність напрацювання. Для цього визначають тривалість інтервалу [9, 10]

$$\Delta t = \frac{R}{1 + 3,3 \lg N_0}, \quad (88)$$

2) визначають середини інтервалів t_i напрацювання

$$t_i = \frac{\Delta t_i}{2}, \quad (89)$$

де Δt_i – різниця між межами i -х інтервалів напрацювання;

4) заповнюють інтервали кількістю відмов у інтервалі n_i ;

5) розраховують параметри безвідмовності для невідновлюваних об'єктів ($W(t)$, $F(t)$, $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$) та статистичні характеристики за методикою, що наведена в п. 1.2.2.1.

Дослідивши вибірку, можна поширити результати з визначеною точністю на інші елементи генеральної сукупності, що експлуатуються в тих самих умовах, та прогнозувати їх показники надійності.

Результати дослідів дають можливість математично описати отримані закономірності, тобто вивести відповідні формули, за якими можна розрахувати показники надійності. Такі формули прийнято називати математичними моделями.

Оскільки показники надійності є випадковими величинами, то їх математичні моделі повинні показати, як розподіляються ці показники залежно від напрацювання. Такими моделями є закони розподілу випадкових величин.

3.2. Теоретичні закони розподілу напрацювання до відмови

Законом розподілу випадкової величини називають будь-яке співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини та відповідними їм імовірностями. Повною характеристикою надійності об'єктів з безперервним характером роботи служить закон розподілу часу безвідмовної роботи. Якщо відомі вигляд закону та його параметри, то легко знайти будь-яку характеристику надійності.

Як теоретичні закони розподілу напрацювання до відмови можуть бути використані різні безперервні розподіли, що застосовуються в теорії ймовірності. Найбільш поширеними законами розподілу відмов об'єктів, що застосовують для елементів колії, є: експонентний, нормальний, зрізаний нормальний, Вейбулла, Релея, та інші.

Для всіх законів розподілу правильні залежності:

$$\left. \begin{aligned} f(t) &= F'(t), \\ F(t) &= \int_0^t f(t)dt, \\ P(t) &= 1 - F(t), \\ \lambda(t) &= f(t)/P(t), \\ T_{\text{ср}} &= \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} P(t)dt, \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

$$\left. \begin{aligned} D(t) &= \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - \left(\int_0^{\infty} t f(t) dt \right)^2 = 2 \int_0^{\infty} t P(t) dt - T_{\text{сер}}^2, \\ S &= \sqrt{D}. \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

3.2.1. Експонентний розподіл

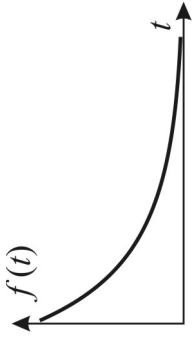
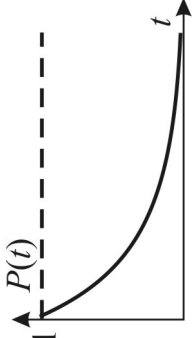
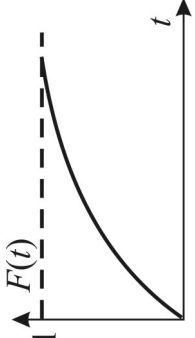
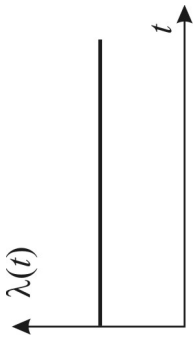
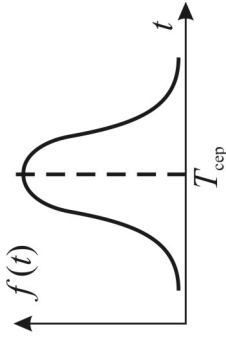
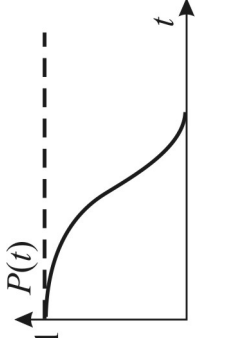
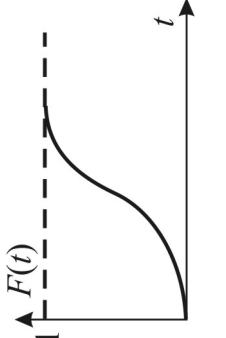
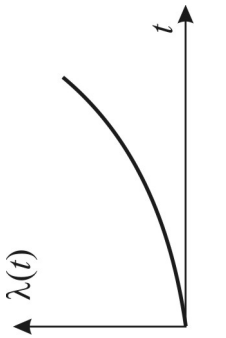
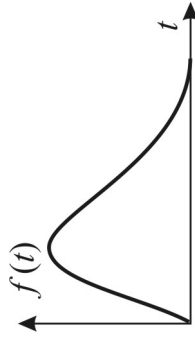
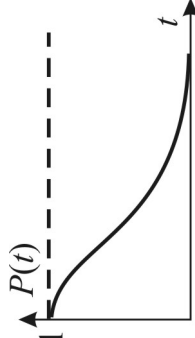
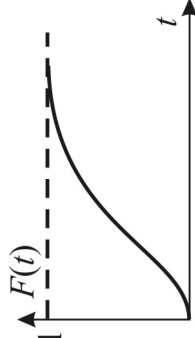
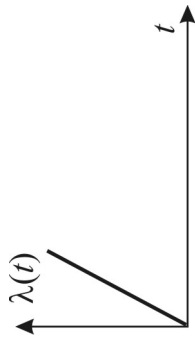
Особливістю експонентного розподілу є постійна інтенсивність відмов ($\lambda = \text{const}$), тобто в рівні проміжки напрацювання кількість виробів, що відмовили, яка припадає на кожне напрацювання, що залишилося працездатним до цього часу, буде постійною. Експонентний розподіл застосовують для раптових відмов елементів і систем. Умова ($\lambda = \text{const}$) означає, що в період експлуатації старіння елементів не відбувається. У зв'язку з цим експонентний розподіл можна застосовувати тільки тоді, коли інтенсивність відмов дійсно постійна і коли вони мають випадковий характер, а не виникають, наприклад, унаслідок зношування. Крім того, для експонентного закону розподілу ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ на даному інтервалі $(t; t + \Delta t)$ не залежить від часу попередньої роботи елемента t , а залежить тільки від довжини інтервалу Δt . Незважаючи на ці обмеження, експонентний розподіл широко застосовується, оскільки відрізняється простотою розрахунків і задовільно відображає відмови великих систем, що складаються з неоднорідних елементів. Ця властивість дозволяє використовувати його в деяких випадках розв'язання задач надійності верхньої будови колії, тим більше, що інтенсивність відмов можна оцінювати і на основі скорочених досліджень. Формули для розрахунку за експонентним розподілом наведені в табл. 3.2 ($e = 2,71828183$ – основа натуральних логарифмів), а графіки в табл. 3.3.

Параметри безвідмовності для різних розподілів

Закон розподілу	Щільність імовірності відмов $f(t)$	Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$	Імовірність відмов $F(t)$	Інтенсивність відмов $\lambda(t)$	Середнє напруження до першої відмови $T_{\text{сер}}$	Дисперсія D_i
Експонентний	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\lambda = \text{const}$	$\frac{1}{\lambda}$	$T_{\text{сер}}^2$
Нормальний	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_{\text{сер}})^2}{2\sigma^2}}$	$1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-T_{\text{сер}})^2}{2\sigma^2}} dt$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-T_{\text{сер}})^2}{2\sigma^2}} dt$	$\frac{f(t)}{P(t)}$	$T_{\text{сер}}$	$\sigma^2 t$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{1}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma$	$\sqrt{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2}$
Вейбулла	$\frac{b}{t_0} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b}$	$e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b}$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b}$	$\frac{b}{t_0} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{b-1}$	$t_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$	$t_0^2 \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) + \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)\right]^2}$

Таблиця 3.3

Графіки параметрів різних розподілів

Закон розподілу	Щільність імовірності відмов $f(t)$	Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$	Імовірність відмов $F(t)$	Інтенсивність відмов $\lambda(t)$
Експонентний				
Нормальний				
Релея				

3.2.2. Нормальний розподіл (закон Гаусса)

Цей закон застосовують у випадках, коли відбуваються процеси, за яких відмови виникають внаслідок впливу декількох рівноправних чинників. Нормальний закон – це закон з двома параметрами: середньоквадратичне відхилення σ та середнє напрацювання до відмови $T_{\text{сер}}$. Формули для розрахунку за нормальним розподілом наведені в табл. 3.2, а графіки в табл. 3.3.

Для полегшення розрахунків частіше використовують так званий нормований нормальний закон розподілу. Він полягає в тому, що середнє значення змінної величини дорівнює нулю, а середнє квадратичне відхилення – одиниці. Розрахунки за цим розподілом виконують за допомогою табл. Д.2 та Д.3. Для цього здійснюють заміну змінної величини іншою:

$$x = \frac{t - T_{\text{сер}}}{\sigma_t}. \quad (91)$$

Звідси крива щільності розподілу буде мати початок координат в точці $T_{\text{сер}}$, функція матиме назву центрована та нормована, а щільність розподілу буде записана у вигляді:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (92)$$

Значення цієї функції наведені в табл. Д.1.

Інтегральна функція є функцією нормального розподілу:

$$F_0(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (93)$$

Значення цієї функції наведені в табл. Д.3.

Якщо $x < 0$, то застосовують формули:

$$\left. \begin{aligned} F_0(-x) &= 1 - F_0(x), \\ \varphi(-x) &= \varphi(x). \end{aligned} \right\} \quad (94)$$

Звідси:

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= F_0(x), \\ f(t) &= \frac{\varphi(x)}{\sigma_t}. \end{aligned} \right\} \quad (95)$$

Слід зауважити, що на відміну від більшості інших розподілів щільність імовірності нормального розподілу визначається в інтервалі $(-\infty, \infty)$. У зв'язку з цим для більшої точності ймовірнісних розрахунків з визначення параметрів надійності використовують зрізаний нормальний розподіл, щільність якого має такий вигляд:

$$f(t) = \begin{cases} \text{при } t < 0 \rightarrow 0, \\ \text{при } t > 0 \rightarrow \left| \frac{C}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \right| e^{-\left(\frac{t-T_{\text{сеп}}}{2\sigma_t}\right)^2}, \end{cases} \quad (96)$$

де C – нормувальний множник, що визначається з умови:

$$1 = \int_0^{\infty} \left| \frac{C}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \right| e^{-\left(\frac{t-T_{\text{сеп}}}{2\sigma_t}\right)^2} dt. \quad (97)$$

Відповідно

$$C = \frac{1}{F_0\left(\frac{T_{\text{сеп}}}{\sigma_t}\right)} = \frac{1}{0,5 + \Phi_0\left(\frac{T_{\text{сеп}}}{\sigma_t}\right)}, \quad (98)$$

де $\Phi_0\left(\frac{T_{\text{сеп}}}{\sigma_t}\right)$ – нормувальна функція Лапласа.

За зрізаним нормальним розподілом імовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P(t) = \frac{F_0 \left(\frac{T_{\text{сер}} - t}{\sigma_t} \right)}{F_0 \left(\frac{T_{\text{сер}}}{\sigma_t} \right)}. \quad (99)$$

При $\frac{T_{\text{сер}}}{\sigma_t} > 2$ значення C мало відрізняється від одиниці, тому часто для більшості розрахунків не акцентують, що використовується зрізаний нормальний розподіл.

3.2.3. Розподіл Релея

Характерною ознакою розподілу Релея є прямо пропорційна залежність інтенсивності відмов від часу. Цей закон розподілу застосовується, наприклад, під час аналізу інтенсивних змін елементів верхньої будови колії. Отже, прямо пропорційна залежність інтенсивності відмов від часу означає, що розглядається період експлуатації об'єктів під час переходу їх до граничного стану, у який відбуваються відмови також з причин старіння елементів та їх зношування. Формули для розрахунку за розподілом Релея наведені в табл. 3.2, а графіки – у табл. 3.3.

σ – це параметр масштабу, $\sigma > 0$; чим більше його значення, тим повільніше змінюється залежність між часом та інтенсивністю відмов.

З виразу визначення $P(t)$ (див. табл. 3.2) видно, що в області малих значень t , де інтенсивність незначна, імовірність безвідмовної роботи системи зменшується з часом повільніше, ніж у разі експонентного розподілу. Це означає, що складні системи, призначені для малого часу безперервної роботи, доцільно будувати на елементах, що мають релеївський закон розподілу часу між відмовами. Умова доцільності застосування таких елементів порівняно з елементами, потік відмов яких підпорядковується експонентному розподілу, $\lambda > \frac{t}{2\sigma^2}$. Ця умова впливає з порівняння ймовірностей безвідмовної роботи при зазначених законах розподілу часу виникнення відмов. Таким чином, особливо високу надійність можуть мати резервовані

системи короткочасної дії з релеївським законом розподілу відмов елементів. Це впливає з основної суперечності резервування, яка полягає в тому, що вираш надійності резервованої системи тим більший, чим надійніша основна система.

В області великих значень t імовірність безвідмовної роботи системи з релеївським законом розподілу відмов елементів зменшується з часом значно швидше, ніж при експонентному. Це означає, що сконструювати на цих елементах високонадійну систему, призначену для тривалої безперервної роботи, досить складно. Таким чином цей закон розподілу застосовують або в разі переходу елементів у граничний стан, або під час розрахунку резервованих систем.

3.2.4. Розподіл Вейбулла

Цей розподіл відрізняється досить високою універсальністю. Формули для розрахунку за розподілом Вейбулла наведені в табл. 3.2. У формулах:

b – це параметр форми, який відповідає за форму кривих параметрів надійності. При $b < 1$ інтенсивність відмов монотонно зменшується, що відповідає періоду припрацювання, при $b > 1$ – монотонно збільшується, що відповідає періоду зносу. Таким чином шляхом підбору параметрів можна отримати таку теоретичну криву $\lambda(t)$, яка достатньо близько збігається з експериментальною кривою, що дасть можливість розрахувати параметри надійності на підставі відмови закономірностей;

t_0 – параметр масштабу, який відповідає за розтягненість кривих вздовж осі t ;

$\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$ – гамма-функція, її значення наведені в табл. Д.4.

Графіки для цього закону розподілу в табл. 3.3 не наведено, тому що параметри не є постійними. Так, якщо параметр форми $b = 1$, розподіл Вейбулла відповідає експонентному розподілу, якщо $b = 2$ – розподілу Релея, якщо $b = 3,25$ – нормальному розподілу.

3.2.5. Метод квантилів

У низці випадків є необхідність розв'язувати обернену задачу, тобто для заданих величин ймовірності відмови або безвідмовності знайти відповідні їм напрацювання. У цьому випадку застосовується метод квантилів.

Квантиль U_p – напрацювання, при якому буде спостерігатися наявна задана ймовірність відмови або безвідмовності. Індекс p означає «ймовірність» і в таблиці квантилів (табл. Д.5) задається в межах $0,5 \leq p \leq 1$. Якщо $p < 0,5$, то визначають $1-p$, тобто $U_{1-p} = -U_p$ та $t_{1-p} = T_{\text{сер}} - U_p \sigma_t$.

Метод квантилів пов'язаний з нормальним законом розподілу, тому прийнято, що ймовірність відмов

$$F(t) = F(t_p). \quad (100)$$

Функція нормального розподілу дорівнює

$$F_0(x) = F_0(U_p). \quad (101)$$

Напрацювання для об'єктів, що відмовили:

$$t = t_p, \quad (102)$$

$$t_p = T_{\text{сер}} + U_p \sigma_t. \quad (103)$$

Квантиль:

$$x = U_p, \quad (104)$$

$$U_p = \frac{t - T_{\text{сер}}}{\sigma_t}. \quad (105)$$

Для кожної ймовірності відмови об'єктів визначаємо квантилі U_p та складаємо рівняння

де $f_2(k), f_3(k)$ – допоміжні функції [12], табл. Д.6;
 k – коефіцієнт зрізання вибірки:

$$k = \frac{T_{\text{сер}} - t_r}{\sigma_t}. \quad (111)$$

3.3. Перевірка відповідності дослідного розподілу теоретичному

Аналізи результатів досліджень виконують, приймаючи умову, що відмови відбуваються за визначеним законом. Таке припущення про вид закону розподілу називають статистичною гіпотезою.

Для визначення правильності обраної гіпотези застосовують критерії відповідності (погодження). Зазвичай на практиці використовують критерії відповідності Колмогорова або Пірсона, особливо під час аналізу в надійності.

Для перевірки за критерієм Пірсона визначають величину (критерій χ^2):

$$\chi_{\text{наоч}}^2 = N_0 \sum_{i=1}^k \frac{(\overline{W}_i - W_i)^2}{W_i}, \quad (112)$$

де N_0 – кількість дослідних елементів;

\overline{W}_i – частоти, що отримані з дослідів;

W_i – частоти, що розраховані за формулами.

Слід зазначити, що кількість спостережень у кожному інтервалі повинна бути не менше 5. Оскільки звичайно нечисленними бувають крайні інтервали, то їх об'єднують, як і відповідні їм частоти.

Отриману величину $\chi_{\text{наоч}}^2$ порівнюють з табличною $\chi_{\text{кр}}^2$, що залежить від кількості степенів вільності r та рівня ймовірності α .

При цьому визначають кількість степенів вільності r :

$$r = k - (s + 1), \quad (113)$$

де k – кількість інтервалів після об'єднання;
 s – кількість параметрів розподілу.

Схема застосування критерію χ^2 :

1) на основі даних дослідження обирають закон розподілу та його параметри;

2) визначають теоретичні та емпіричні частоти;

3) визначають величину $\chi_{\text{наоч}}^2$;

4) визначають кількість степенів вільності r ;

5) з таблиць за отриманими значеннями r знаходять $\chi_{\text{кр}}^2$;

6) формулюють висновок: якщо $\chi_{\text{наоч}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2$, вважають, що різниця між теоретичними й емпіричними частотами несуттєва, а дослідний розподіл відповідає обраному теоретичному. Якщо $\chi_{\text{наоч}}^2 > \chi_{\text{кр}}^2$, то такий розподіл визнають не випадковим, а обраний закон розподілу відхиленням.

Критерій Пірсона застосовують тільки якщо вибірка елементів $N_0 > 100$ шт.

У разі використання критерію Колмогорова як міру розходження теоретичного та експериментального розподілу використовують величину D^* , що визначають таким чином:

$$\text{якщо } N_0 \leq 100, D_{N_0}^* = D_{\text{max}}, \quad (114)$$

$$\text{якщо } N_0 > 100, D^* = \sqrt{N_0} D_{\text{max}}, \quad (115)$$

де D_{max} – максимальне абсолютне значення різниці емпіричної та теоретичної функцій розподілу;

N_0 – обсяг вибірки (кількість відмов).

Заключним етапом перевірки за критерієм Колмогорова є порівняння результатів (112) з квантилем розподілу Колмогорова y_α за рівнем $\gamma = 1 - \varepsilon$. Якщо $D_{N_0}^*(D^*) < y_\alpha$, вважають, що різниця між теоретичними та емпіричними частотами несуттєва, а дослідний розподіл відповідає обраному теоретичному. Якщо $D_{N_0}^*(D^*) \geq y_\alpha$, то такий розподіл визнають не випадковим, а обраний закон розподілу відхиленням.

Контрольні запитання та завдання

1. Поясніть терміни: «генеральна сукупність»; «вибірка»; «репрезентативна вибірка»; «відносна похибка»; «надійні імовірності».
2. Який порядок визначення обсягу вибірки, якщо закон розподілу вибірки відомий?
3. Який порядок визначення обсягу вибірки, якщо закон розподілу вибірки невідомий?
4. Яким чином встановлюють діапазони напрацювання під час обробки даних спостережень?
5. Яким чином встановлюють величини інтервалів напрацювання під час обробки даних спостережень?
6. Яким чином встановлюють кількість інтервалів напрацювання під час обробки даних спостережень?
7. Яким чином встановлюють середини інтервалів напрацювання під час обробки даних спостережень?
8. Які теоретичні закони розподілу напрацювання до відмови ви знаєте?
9. Чи змінюються основні залежності між параметрами безвідмовності й статистичними параметрами?
10. Яка особливість експонентного розподілу? нормального розподілу? розподілу Вейбулла? розподілу Релея?
11. Коли застосовують експонентний розподіл? нормальний розподіл? розподіл Релея? розподіл Вейбулла? метод квантилів?
12. Наведіть графіки параметрів експонентного розподілу; нормального розподілу; розподілу Релея; розподілу Вейбулла.
13. Яким чином перевірити відповідність дослідного розподілу теоретичному?
14. Які критерії застосовують для перевірки відповідності дослідного розподілу теоретичному?
15. Чим відрізняються критерії Колмогорова та Пірсона?
16. Коли вважається, що різниця між теоретичним та емпіричним законами розподілу несуттєва за критеріями Колмогорова та Пірсона?

Моделі для об'єктів, що ремонтуються

4.1. Загальні підходи

У п. 1.2.2.1 розглядалася робота елементів до першої відмови. Зараз будемо вважати, що елемент після відмови відновлюється. Це відновлення може мати різний характер: елемент може бути замінений новим, ідентичним йому елементом або може бути виконано такий ремонт, який повністю відновлює всі його властивості. Тобто не суттєво, яким чином буде досягнуто відновлення. Якщо об'єкти відновлюються, то є періоди безвідмовної роботи $P_i(\tau_i)$, час на ремонт $B_j(\tau_j^{\text{відн}})$ та час на технічне обслуговування $TO_\tau(\tau_\tau^{\text{відн}})$ за деяке напрацювання t . Такий процес показано на рис. 3. Випадковий час між черговими відновленнями становить $t_i = P_i + B_j + TO_\tau = \tau_i + \tau_k^{\text{відн}}$, де τ_i – час безвідмовної роботи об'єкта, $\tau_k^{\text{відн}}$ – час відновлення об'єкта.

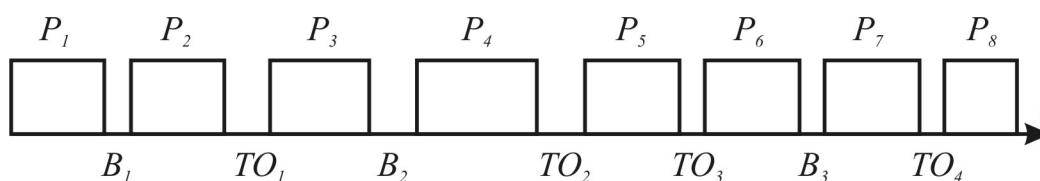


Рис. 3. Реалізація випадкового процесу роботи відновлюваного об'єкта

Періоди відмов та відновлення утворюють випадковий потік, що має назву процес відновлення.

Але іноді вважають, що час відновлення значно менший, ніж час безвідмовної роботи $\sum_{i=1}^n P_i \gg \sum_j B_j + \sum_{\tau=1}^m TO_\tau$. Такий процес наведено

на рис. 4, де τ_i – час безвідмовної роботи об'єкта, $t_1 = \tau_1$, $t_2 = \tau_1 + \tau_2$,
 $t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$.

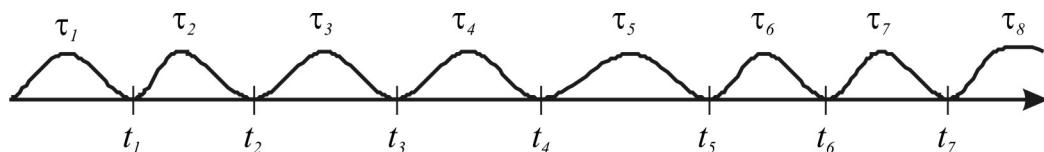


Рис. 4. Графік потоку відмов процесу відновлення

Таким чином, маємо відмови раптові (припинення руху поїздів з різних причин) та планові (заплановані ремонти та технологічні «вікна»).

4.2. Показники надійності для об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання

Показники об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання, визначають за напрацюванням (див. рис. 4). Сумарне напрацювання до виникнення i -ї відмови $t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$, де τ_i – напрацювання між відмовами.

Можливі два шляхи оцінки об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються:

- 1) визначення характеристик потоку відмов;
- 2) визначення умовних розподілів напрацювання між відмовами.

Перший спосіб є загальноприйнятим. Розглядають потоки випадкових подій, кожна з яких полягає в появі відмови об'єкта. Потік відмов може бути охарактеризований провідною функцією $\Omega(t)$ – математичне сподівання кількості відмов на інтервалі $(0, t)$. Але ж частіше як показник надійності використовують параметр потоку відмов ω – щільність імовірності виникнення відмови об'єкта, що ремонтується, яку визначають для розглядуваного часу сумарного напрацювання. При цьому вважають, що ймовірність появи двох і більше відмов дуже мала. Для розрахунку використовують дві математичні

моделі потоку випадкових подій: кількісний опис ординарних потоків, реальний потік відмов.

Кількісний опис ординарних потоків є найпростішим за відсутності наслідків, коли ймовірність появи відмови об'єктів у будь-якому інтервалі напрацювання (t_1, t_2) не залежить від появи відмови в інших інтервалах напрацювання, які не перетинаються з інтервалом напрацювання, що розглядається.

Для ординарних (без наслідків (пуассонівських)) потоків відмов ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі (t_1, t_2) :

$$\tilde{P}(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt} . \quad (116)$$

Прийнято вважати, що пуассонівський потік відмов характерний для складних нерезервованих систем, що утворюються високонадійними елементами. Для системи, яка «гарно спроектована», тобто не має окремих малонадійних елементів, значення параметра потоку відмов яких рівноцінні зі значеннями параметра потоку відмов всієї системи, поява відмов на одному інтервалі напрацювання майже не впливає на ймовірність появи будь-якої кількості відмов на іншому інтервалі, що не перетинається з першим.

У разі стаціонарного ($\omega = \text{const}$) потоку відмов без наслідків ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі Δt :

$$\tilde{P}(\Delta t) = e^{-\omega \Delta t} . \quad (117)$$

Іноді припущення про відсутність наслідків є грубим. Тоді як модель *реальних потоків відмов* можуть розглядатися потоки відмов з обмеженими наслідками, у яких значення напрацювань між послідовними відмовами є незалежними випадковими величинами. Обмежений наслідок проявляється в тому, що ймовірність появи відмови за напрацювання (t_1, t_2) залежить від напрацювання, що накопичилося від останньої відмови, і не залежить від того, коли відбулися попередні відмови.

Якщо випадкові величини напрацювання між відмовами однаково розподілені та незалежні, то параметр потоку відмов пов'язаний зі щільністю напрацювання між відмовами $f(t)$ рівнянням:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t f(t - \tau)\omega(\tau)d\tau. \quad (118)$$

У загальному випадку це рівняння інтегрується кількісно. При цьому можна використовувати метод послідовних наближень. Відповідно до даного методу виконуються послідовні розрахунки за формулою:

$$\omega_{i+1}(t) = f(t) + \int_0^t f(t - \tau)\omega_i(\tau)d\tau \quad (119)$$

доти, поки значення $\omega_{i+1}(t)$ та $\omega_i(t)$ будуть практично збігатися. Як нульове наближення зручно використовувати інтенсивність відмов $\lambda(t)$. Якщо напрацювання між відмовами має експонентний розподіл, то $\omega = \lambda = \text{const}$.

У технічних завданнях на об'єкти, що проектуються, часто використовують середній показник:

$$\omega_{\text{сеп}} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \omega(t)dt, \quad (120)$$

де t_p – технічний ресурс об'єкта.

Другий спосіб – визначення умовних розподілів напрацювання між відмовами стає необхідним за наявності в потоці відмов значних наслідків. Такий спосіб оцінки надійності може застосовуватися для зношуваних об'єктів, що ремонтуються. Ці особливості не враховуються, якщо розглядаються потоки відмов без наслідків або без обмежених наслідків.

Більшість типів об'єктів, що ремонтуються за час експлуатації, відмовляють обмежену кількість разів (не більше трьох–п'яти). Деякі екземпляри об'єктів можуть взагалі не відмовляти протягом всього ресурсу (строку служби). Якщо конкретний екземпляр об'єкта починає часто відмовляти, його взагалі знімають з експлуатації.

Розпізнавальною особливістю зношуваних об'єктів, що ремонтуються, є наявність корельованих відмов. Тобто, напрацювання між i -ю та $(i+1)$ -ю відмовами корельовано з напрацюванням до i -ї

відмови. При цьому розподіл напрацювання між відмовами за весь час змінювався в міру зношування об'єктів. Будь-яка профілактика або ремонт викликають зміну кореляції між відмовами. Тому доцільно технічний ресурс (строк служби) поділити на періоди між суттєвими профілактичними роботами та визначати для кожного періоду свої показники надійності.

Для різних законів розподілу в табл. 4.1 наведені параметри розподілу та їх початкові й сталі значення.

Таблиця 4. 1

Параметри для різних законів розподілу

Закон розподілу	Параметри розподілення	Початкове значення	Стале значення
Експонентний	λ	λ	λ
Нормальний	$T_{\text{сер}}, \sigma$	0	$1/T_{\text{сер}}$
Релея	σ	0	$0,797/\sigma$
Вейбулла	b, t_0	0	$\frac{t_0^{1/b}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{b}\right)}$

Визначаючи умовні розподіли напрацювання між відмовами, можна відраховувати напрацювання від моменту закінчення відповідного ремонту або суттєвого профілактичного заходу.

Показники надійності в цьому випадку такі самі, як і для об'єктів, що не ремонтуються, тільки вони є умовними, тобто визначаються за умови, що відбулася визначена кількість відмов. Ці показники надійності характеризують розподіл випадкової величини – напрацювання між i -ю та $(i+1)$ -ю відмовами.

Якщо зі збільшенням сумарного напрацювання виникають більш суттєві відмови, то іноді доцільно розглядати об'єк, що ремонтується, як такий, що не ремонтується, та визначати декілька розподілів напрацювання до відмови, що відповідають різним визначенням непрацездатного стану, наприклад розподіл напрацювання до першої відмови, розподіл напрацювання до незначного ремонту, розподіл напрацювання до середнього ремонту, розподіл напрацювання до капітального ремонту й т. ін.

4.3. Показники надійності для об'єктів, що ремонтуються та відновлюються в процесі використання

Показники надійності для об'єктів, що ремонтуються та відновлюються в процесі використання, визначаються тільки в календарному часі.

Такі об'єкти поділяють на дві групи:

1) об'єкти, для яких протягом часу роботи допускаються відмови та викликані ними тимчасові перерви в роботі. Для об'єктів цієї групи велике значення має властивість готовності – здатність перебувати в процесі експлуатації максимальний час в працездатному та готовому до використання стані;

2) об'єкти, відмови яких протягом запланованого часу не допустимі. Якщо в цих об'єктах (системах) є надлишкові елементи, то в разі відмов деяких з них об'єкт залишається працездатним та є можливість проводити ремонт елементів, що відмовили, під час виконання завдання.

Один і той самий об'єкт може бути віднесеним до різних груп залежно від його використання.

Розглянемо процес експлуатації об'єктів першої групи.

Випадковий час між черговими відновленнями (див. рис. 3) становить $t_i = P_i + B_j + TO_\tau = \tau_i + \tau_k^{\text{відн}}$, де τ_i – час безвідмовної роботи об'єкта, $\tau_k^{\text{відн}}$ – час відновлення об'єкта.

Якщо випадкові величини τ_i та $\tau_k^{\text{відн}}$ незалежні, то щільність розподілу їх суми t_0 за відомим з теорії ймовірностей правилом про композиції розподілів дорівнює

$$f_0(t) = \int_0^t f(\tau_i)g(t - \tau_k^{\text{відн}})d\tau, \quad (121)$$

де $f(\tau_i)$ – щільність розподілу часу безвідмовної роботи;

$g(t)$ – щільність розподілу часу відновлення (ремонт) об'єкта.

За аналогією з об'єктами, що ремонтуються, але не відновлюються, можна розглядати потік відновлення з параметрами:

$$\omega(t) = f_0(t) + \int_0^t f_0(t-\tau)\omega_0(\tau)d\tau, \quad (122)$$

де $f_0(t)$ – щільність розподілу часу між черговими відновленнями.

Параметр відновлення $\omega_0(t)$ та щільність $f_{0n}(t)$ розподілу часу до появи n -го відновлення (цей час дорівнює $t_i = \tau_i + \tau_k^{\text{відн}}$) пов'язані співвідношенням

$$\omega_0(t) = \sum_1^{\infty} f_{0n}(t). \quad (123)$$

У технічних завданнях на об'єкти, що проектуються, часто використовують середній показник:

$$\tilde{\omega}_{\text{сер}} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \omega_0(t)dt, \quad (124)$$

де t_p – технічний ресурс об'єкта.

Надійність об'єктів першої групи може бути оцінена за допомогою миттєвих та числових параметрів. Одним з миттєвих параметрів є параметр потоку відновлення $\omega_0(t)$, але звичайно застосовують імовірність того, що об'єкт залишиться працездатним (готовим до застосування) в момент часу t_i , або ймовірність того, що об'єкт у момент часу t_i буде перебувати в непрацездатному стані $\Pi(t_i) = 1 - \Gamma(t_i)$ (у стані вимушеного простою), де $\Gamma(t_i)$ – функція готовності.

Об'єкт може перебувати в працездатному стані за двох умов:

- об'єкт протягом часу $(0, t)$ не відмовив;
- об'єкт відмовляв та відновлювався, але в період часу після останнього відновлення не відмовляв.

Імовірність $\Gamma(t)$ застати об'єкта працездатним у момент часу t дорівнює сумі ймовірностей появи зазначених подій. Імовірність появи першої події дорівнює ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ об'єкта протягом часу $(0, t)$. Імовірність $\Gamma(t)$ того, що об'єкт залишиться працездатним у момент часу t , дорівнює:

$$\Gamma(t) = P(t) + \int_0^t P(t-\tau)\omega_0(\tau)d\tau. \quad (125)$$

При $t \rightarrow \infty$ функція $\Gamma(t)$ наближається до сталих значень коефіцієнта готовності K_G , який не залежить від розподілів випадкових величин часу роботи та ремонту об'єкта. Часто використовують середнє значення за термін служби $t_{\text{сл}}$ роботи об'єкта

$$\tilde{K}_G = \frac{1}{t_{\text{сл}}} + \int_0^{t_{\text{сл}}} \Gamma(t)dt. \quad (126)$$

Середній час відновлення об'єкта $\overline{\tau^{\text{відн}}}$ можна знайти за залежністю:

$$\overline{\tau^{\text{відн}}} = \int_0^{\infty} tg(t)dt = \int_0^{\infty} (1-G(t))dt = \frac{1}{N(0)} \sum_1^{N(0)} \tau_i^{\text{відн}}, \quad (127)$$

де $N(0)$ – кількість об'єктів, що почали працювати після $(k-1)$ відновлень.

Середній час між відмовами об'єкта \bar{t} можна знайти за залежністю:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tf_k(t)dt = \int_0^{\infty} P_k(t)dt = \frac{1}{N(0)} \sum_1^{N(0)} \tau_i, \quad (128)$$

де $f_k(t)$, $P_k(t)$ – відповідно щільність відмов та ймовірність безвідмовної роботи розрахованих до $(k-1)$ відновлень на момент часу t ;

t – момент часу, що розглядається;

τ_i – час безвідмовної роботи об'єкта.

Інтенсивність відновлення об'єкта в момент часу (33) можна також знайти як

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1-G(t)}, \quad (129)$$

де $\mu(t)$ – умовна щільність імовірності відновлення об'єкта в момент часу t , що розраховується від моменту початку відновлення, за умови, що до моменту часу t відновлення не відбувалось. Також знаходять значення коефіцієнта оперативної готовності $K_{ог}$ та коефіцієнта технічного використання $K_{ТВ}$.

Надійність об'єктів другої групи (відмови не допустимі, можливе проведення ремонтів деяких елементів під час виконання завдань) найчастіше оцінюють за допомогою умовної ймовірності безвідмовної роботи $\overline{P(t_i, t_j)}$ протягом заданого інтервалу часу (t_i, t_j) за умови, що в початковий момент часу всі елементи працездатні. Різниця $\overline{P(t_i, t_j)}$ від відповідного показника об'єкта, що не ремонтується, полягає в тому, що під час визначення $\overline{P(t_i, t_j)}$ враховується ремонт елементів, що відмовили в працездатному об'єкті (системі).

Для об'єктів другої групи як параметри надійності можуть використовуватися параметр потоку відмови, напрацювання на відмову та інші.

Усі параметри надійності об'єктів, що розглянуті в цьому розділі, можна розбити на три групи:

- 1) інтервальні, що належать до інтервалу часу або напрацювання (t_1, t_2) ;
- 2) миттєві, відповідають заданому часу або напрацюванню t ;
- 3) кількісні, що не пов'язані з положенням заданого інтервалу або моменту часу (напрацювання).

Основні параметри надійності наведені в табл. 4.2, до якої не включено параметри, пов'язані з умовними розподілами напрацювання між відмовами об'єктів, що ремонтуються але не відновлюються в процесі експлуатації. Ці параметри аналогічні параметрам для об'єктів, що не відновлюються та доповнюються моментами зв'язку або коефіцієнтами кореляції між відмовами.

Параметри надійності об'єкта за групами

Параметри надійності	Вид об'єктів			
	Не ремонтуються	Ремонтуються, але не відновлюються	Ремонтуються та відновлюються	
			Відмови допустимі	Відмови не допустимі
Інтервальні	$P(t), P(t_i, t_j)$	$\tilde{P}(\Delta t), \tilde{P}(t_1, t_2)$	–	$\overline{\overline{P(t_i, t_j)}}$
Миттєві	$f(t), \lambda(t)$	$\omega(t)$	$\Gamma(t)$	$\omega_0(t)$
Кількісні	$T_{\text{сер}}, t_n, \lambda_{\text{сер}}$	$t_{\text{відм}}, \omega_{\text{сер}}$	$\bar{t}, \overline{\tau^{\text{відм}}}, \tilde{K}_\Gamma, K_\Gamma$	$\overline{\tau^{\text{відм}}}, \tilde{\omega}_{\text{сер}}$

4.4. Класифікація резервованих технічних систем

У п. 1.2.5 уже йшла мова про резервування та було наведено основні поняття резервування як методу підвищення надійності об'єкта за рахунок введення на проектній стадії та використання під час експлуатації додаткових, понад мінімально необхідні, елементів або функціональних можливостей (рис. 5).

Різні резервовані об'єкти в першу чергу відрізняються за реакцією на появу відмови, тобто динамічними властивостями. З цього погляду виділяють два способи резервування.

За першого способу структура об'єкта така, що в разі появи відмови вона переналаштовується й об'єкт відновлює свою працездатність, тобто відбувається саморемонт об'єкта. При цьому об'єкт активно реагує на появу відмови, тому цей спосіб має назву *активне резервування*.

Окремим випадком активного резервування є резервування заміщенням, за якого функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

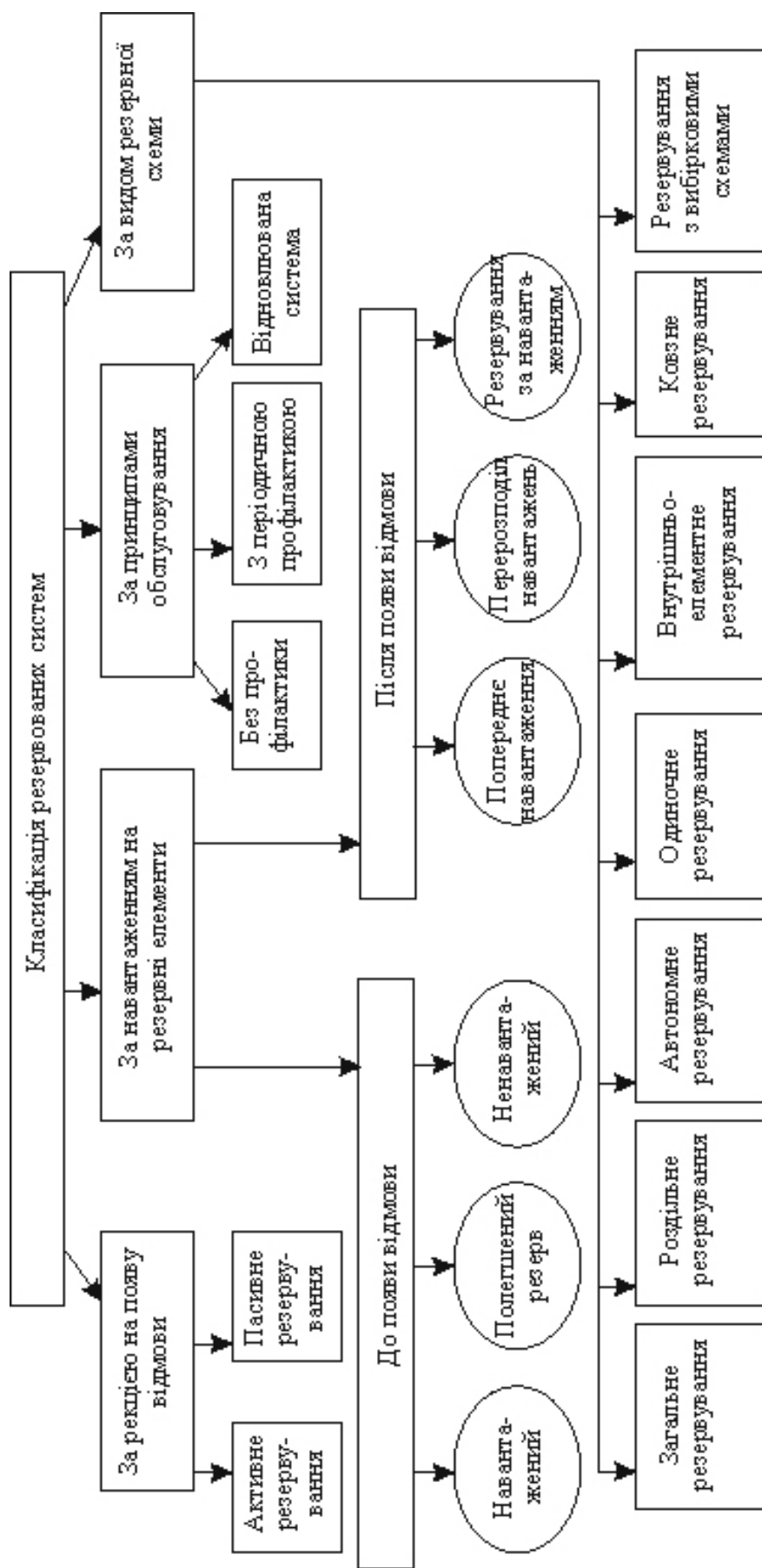


Рис. 5. Загальна схема класифікації резервованих технічних систем

В об'єктах з активним резервуванням велике значення мають умови роботи резерву (навантаження) до появи відмови, тобто до перебудови структури. Розрізняють навантажений резерв, ненавантажений та полегшений. Для систем керування рухомими об'єктами характерні умови роботи першого виду, що пояснюється двома обставинами:

1) значну частину відмов становлять раптові відмови від важких динамічних навантажень, однакових для резервних та основних елементів (вібрація, удари й т. ін.);

2) час увімкнення резервного елемента після відмови працюючого елемента при ненавантаженому резервуванні недопустимо великий.

У системах з активним резервуванням відбувається порушення роботи системи на час з моменту відмови робочого елемента (ділянки системи) до моменту включення резервного. Там, де така перерва в роботі недопустима, можливим є тільки метод пасивного резервування.

За другого способу – *пасивне резервування об'єкта* – відмова одного або декількох елементів не впливає на його роботу. Елементи поєднані постійно, і перебудови структури не відбувається. Об'єкт ніби пасивно чинить опір відмові елементів. Якщо необхідно підкреслити, що резервні елементи беруть участь у функціонуванні об'єкта нарівні з основними, то таке резервування називають постійним.

Оскільки при пасивному резервуванні об'єкт, що відмовив, не вимикається, то в разі створення систем з пасивним резервуванням доводиться враховувати різні наслідки, до яких може призвести відмова елемента.

У разі відмови хоча б одного елемента системи з пасивним резервуванням може змінюватися навантаження, що сприймається елементами, які залишилися працездатними. Тому в об'єктах з пасивним резервуванням велике значення мають умови роботи елементів після появи відмови, тобто стабільність навантаження на ті елементи, що залишилися працездатними.

За цим показником розрізняють три види об'єктів з пасивним резервуванням:

– системи з незмінним навантаженням, у яких у разі відмови одного або декількох елементів не змінюється навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

– системи з перерозподілом навантажень, у яких у разі відмови хоча б одного елемента змінюється (звичайно збільшується) навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

– системи з резервуванням за навантаженням, у яких у разі відмови хоча б одного елемента система виходить з ладу, але інтенсивність відмов елементів зменшена за рахунок того, що навантаження, яке повинен був сприймати один елемент, сприймається декількома елементами.

Найбільший вигреш у надійності досягається в системах з незмінним навантаженням, найменший – у системах з резервуванням за навантаженням.

Обидва методи резервування можуть бути реалізовані шляхом застосування різних видів резервних систем.

Розрізняють такі резервні системи:

1) загальне резервування – полягає в резервуванні об'єкта в цілому;

2) автономне резервування – є одним з варіантів загального. Воно полягає в застосуванні декількох незалежних об'єктів, що виконують одне й те саме завдання. Кожний із цих об'єктів має свій вхід та вихід з незалежним живленням. Автономне резервування зазвичай застосовують під час проведення відповідальних експериментів та в системах відповідального призначення. Якщо інші системи можуть бути використані при різних резервуваннях, то автономне – тільки при пасивному резервуванні;

3) роздільне резервування полягає в резервуванні об'єкта за окремими ділянками. Систему з активним загальним резервуванням можна вважати окремим випадком системи з роздільним резервуванням при одній ділянці резервування;

4) одиничне резервування – полягає в заміні елементів об'єкта елементарними резервованими схемами (зазвичай пасивними). У складних системах дуже важко знайти раціональну схему роздільного резервування. Крім того, схеми резервування різних об'єктів кожного разу доводиться проектувати заново, що потребує значних затрат часу та коштів, тому одиничне резервування має широке застосування – у цьому разі прості резервовані схеми типових елементів виконуються у вигляді готових блоків. Найпростішим є одиничне пасивне резервування, за якого окремі елементи замінюються пасивними резервованими схемами;

5) внутрішньоелементне резервування – полягає в резервуванні внутрішніх зв'язків елементів (з теоретичного погляду майже до молекулярних). Якщо при одиничному резервуванні використовуються схеми з існуючих елементів, то внутрішньоелементне резервування пов'язане зі зміною конструкції елементів. Прикладом застосування цього резервування є електричне реле;

б) ковзне резервування – застосовується в системах з однаковими елементами. Воно полягає в тому, що використовується найбільша кількість резервних елементів, які можуть бути увімкнені в будь-який момент замість будь-якого елемента основної системи, що відмовив;

7) резервування з вибірковими схемами – порівнюються сигнали на виході непарної кількості паралельно працюючих пристроїв, і в зовнішню ланку видається сигнал, що наявний на виході більшості пристроїв. Такі схеми застосовуються у випадках, коли важко встановити відмовили чи ні окремі пристрої.

Резервовані об'єкти важливо розділяти за принципами обслуговування. Існує така класифікація:

– без профілактики – працездатність основних та резервних елементів не контролюється, система використовується до моменту відмови з причини виходу з ладу всіх резервних елементів;

– з періодичною профілактикою – контроль та відновлення працездатності виконуються періодично; протягом часу (циклу) роботи системи не можна вживати профілактичних заходів;

– з профілактикою в процесі роботи – елементи, що відмовили, можна відновлювати в процесі роботи.

Структура системи (об'єкта) зображується у вигляді логічних систем елементів, з'єднаних послідовно, паралельно та послідовно-паралельно.

Послідовне з'єднання – це таке з'єднання елементів, за якого відмова хоча б одного з них призводить до відмови всієї системи (рис. 6). Напрацюванням до відмови системи є напрацювання до відмови елемента, у якого воно мінімальне.

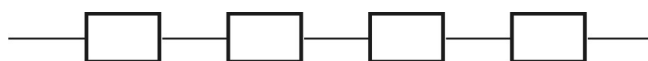


Рис. 6. Структурна схема при послідовному з'єднанні елементів

Для послідовного з'єднання елементів імовірність безвідмовної роботи оцінюється за формулою:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (130)$$

де n – кількість послідовно з'єднаних елементів;

p_i – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента.

Паралельне навантажене з'єднання (рис. 7) відповідає випадку, коли система зберігає працездатність, поки працездатний хоча б один з включених у роботу елементів. Напрацювання до відмови системи дорівнює максимальному із значень напрацювання до відмови елемента.

Паралельне ненавантажене з'єднання (рис. 8) відповідає випадку, коли в разі відмови елемента в роботу включається наступний резервний елемент і таким чином система зберігає свою працездатність. Напрацюванням до відмови системи є сума напрацювань до відмови елементів.

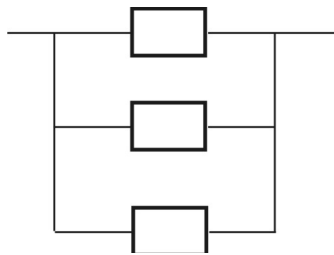


Рис. 7. Структурна схема при паралельному навантаженому з'єднанні елементів

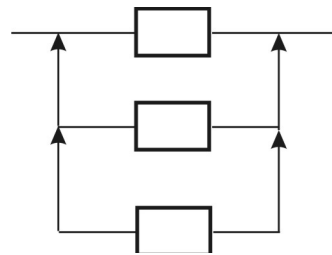


Рис. 8. Структурна схема при паралельному ненавантаженому з'єднанні елементів

Безвідмовність роботи при паралельному з'єднанні розраховується так:

$$P(t) = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i \right). \quad (131)$$

Для рівнобіжного з'єднання k однакових елементів

$$P(t) = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i \right)^k. \quad (132)$$

4.5. Параметрична надійність залізничної колії

Зміна властивостей та станів елементів конструкції колії є безперервним процесом. На характер процесу старіння елементів колії впливають умови експлуатації (навантаження від колісних пар на рейки, швидкість руху, кліматичні умови), властивості матеріалів самих елементів та інші фактори.

Процеси старіння колії можна оцінювати за змінами отриманих параметрів, тобто за змінами напружено-деформованого стану колії в конкретних умовах експлуатації. Числові характеристики процесів, зміни цих параметрів можуть бути визначені за допомогою спостереження та фіксації в міжремонтні періоди показників зносу, деформацій, дефектів рейок та інших елементів колії.

Під час розгляду процесу старіння, якщо можливо визначити частину, що формує стохастичну природу у вигляді випадкової величини або стаціонарної функції, використовують лінійні й нелінійні випадкові процеси.

При лінеаризації процесу вихідного параметра $Y(t)$ його апроксимують лінійною випадковою функцією:

$$Y(t) = a + bt, \quad (133)$$

де a – початкове значення;

b – швидкість зміни вихідного параметра.

Математичне сподівання, дисперсія та середньоквадратичне відхилення лінійної випадкової функції визначаються виразами:

$$m_y(t) = m_a + m_b t, \quad (134)$$

$$D_y(t) = D_a + 2tk_{ab} + D_b t^2, \quad (135)$$

$$\sigma_y(t) = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 t^2}, \quad (136)$$

де m_a , m_b , σ_a , σ_b , D_a , D_b – математичне сподівання, середньоквадратичне відхилення та дисперсії відповідно початкового значення та швидкості зміни вихідного параметра (випадкових величин a та b); k_{ab} – момент кореляційного зв'язку випадкових величин a та b .

Якщо відомі характеристики випадкових процесів зміни вихідних параметрів системи, можна визначити розподіл напрацювання до відмови. На рис. 9 наведено схему формування закону розподілу $f_y(t)$ для випадку, коли зміна вихідного параметра $Y(t)$ описується лінійною випадковою функцією (66).

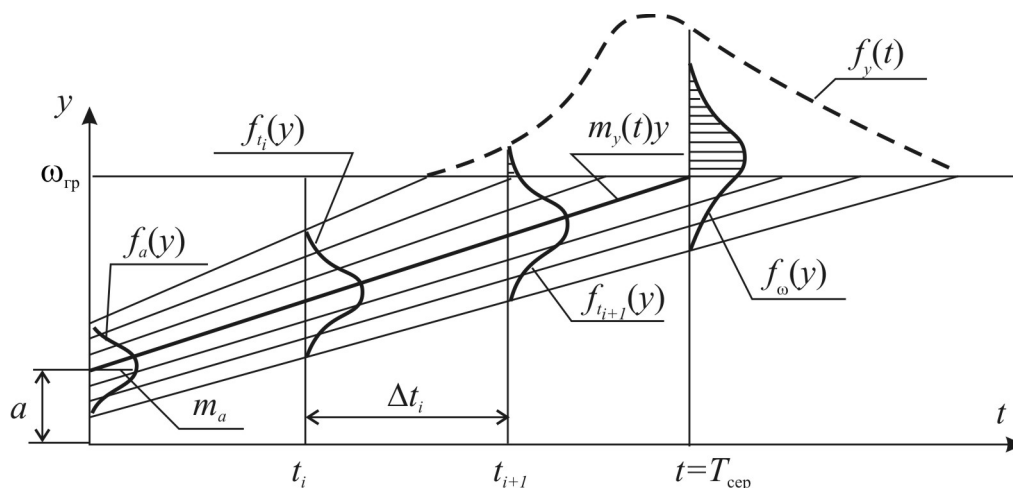


Рис. 9. Схема формування поступових відмов

У початковий момент часу існує розсіювання вихідного параметра системи $f_a(y)$ відносно математичного сподівання m_a . На зміну вихідного параметра $Y(t)$ впливають процеси старіння колії. Швидкість зміни вихідного параметра B також є випадковою величиною і залежить від пошкодження окремих елементів залізничної колії.

Відмови зв'язків відбуваються, коли окремі реалізації процесу $Y(t)$ перетинають область допустимих значень $\omega_{гр}$. Також потрібно наголосити, що в загальному випадку значення $\omega_{гр}$ також має розсіювання.

Імовірність того, що об'єкт при напрацюванні t_{i+1} перебуває в непрацездатному стані, дорівнює (відповідає) заштрихованій площі кривої розподілу $f_{t_{i+1}}(y)$ над границею $\omega_{гр}$ (рис. 7). Приріст цієї площі за період Δt_i пропорційний імовірності відмов об'єкта за цей період. Таким чином відбувається формування закону розподілу $f_y(t)$, який може бути визначений як [13]

$$f_y(t) = \frac{-m_b(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 t^2) + \sigma_b^2 t^2 (m_a + m_b t - \omega_{гр})}{\sqrt{2\pi} \sqrt{(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 t^2)^3}} e^{-\frac{(\omega_{гр} - m_a + m_b t)^2}{2(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 t^2)}}. \quad (137)$$

Гранично допустимі значення $\omega_{гр}$ визначаються вимогами безпеки або ефективності функціонування системи та регламентовані Правилами технічної експлуатації залізниць України, інструкціями й технічними вказівками.

Числові характеристики лінійного випадкового процесу визначають за допомогою спостереження та фіксації в міжремонтні періоди відповідної величини та визначення за результатами цих спостережень розподілу напрацювання до відмови для конкретного випадку.

Нелінійні процеси вихідного параметра $Y(t)$ апроксимують випадковою функцією:

$$Y(t) = a + \alpha T^\beta, \quad (138)$$

де a – показник, що характеризує вихідний параметр по закінченню процесу стабілізації колії після капітального ремонту. У зв'язку з невеликими його значеннями порівняно з кінцевими значеннями вихідного параметра, по закінченню ресурсу перед виконанням капітального ремонту часто приймають $a = 0$. У зв'язку з цим використовують таку залежність:

$$Y(t) = \alpha T^\beta, \quad (139)$$

де α – випадкова величина, що залежить від конструкції залізничної

колії та умов її роботи. При коефіцієнті варіації $v_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{m_\alpha}$

(σ_α, m_α – відповідно середньоквадратичне відхилення та дисперсія величини α , які отримують на основі обробки статистичних даних) у межах $v_\alpha = 0,1 \dots 0,4$ з достатньою точністю вважають, що вона підпорядковується нормальному закону розподілу; при $v_\alpha > 0,4$ приймають розподіл Вейбулла;

β – детермінована величина, отримана з апроксимації.

Вираз (139) застосовують для прогнозування надійності колії та планування ремонтів колії за даними про відмови її елементів.

Спрощену модель процесу зміни вихідного параметра $Y(t)$ до граничного стану наведено на рис. 10. На схемі показано окремі реалізації процесу $Y(t)$, але пояснення таке саме, як і для схеми формування поступових відмов.

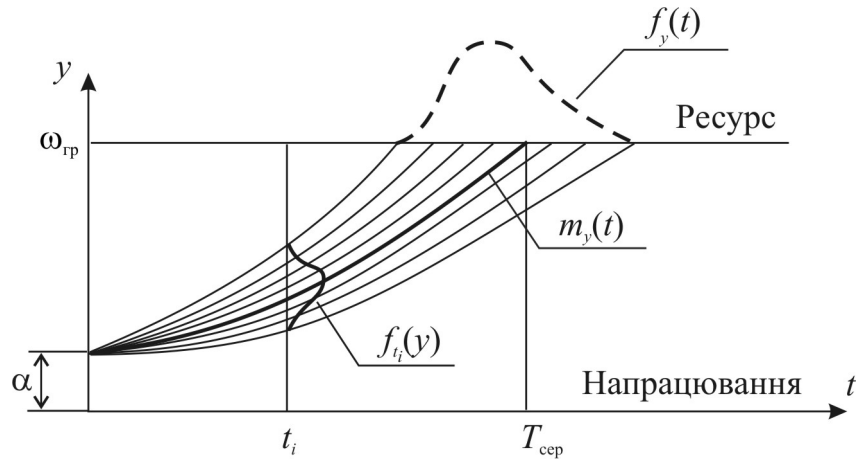


Рис. 10. Схема формування відмов при нелінійній залежності вихідного параметра від напрацювання

Залежність для визначення напрацювання до відмови має вигляд:

$$T = \left(\frac{\omega_{\text{гр}}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (140)$$

Імовірність безвідмовної роботи становить:

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = F_0 \left[\frac{\frac{\omega_{\text{гр}}}{T^{\beta}} - m_{\alpha}}{\sigma_{\alpha}} \right]. \quad (141)$$

Значення дисперсії та середньоквадратичного відхилення можна визначити для будь-якого значення напрацювання як

$$D_\alpha = \frac{D_y(t)}{T_i^{2/3}}, \quad (142)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_y(t)}{T_i^\beta} = \alpha_1 T^{(\beta_1 - \beta)}, \quad (143)$$

де $D_y(t)$, $\sigma_y(t)$ – дисперсія та середньоквадратичне відхилення вихідного параметра $Y(t)$.

Функція $\alpha(t)$ обернена функції (140):

$$\alpha(t) = \frac{\omega_{\text{гр}}}{T_i^\beta}, \quad (144)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\omega_{\text{гр}}\beta}{T_i^{\beta+1}}. \quad (145)$$

За параметрами D_α , m_α можна визначити ймовірність безвідмовної роботи за будь-якого напрацювання T . Ймовірність безвідмовної роботи за гамма-процентним ресурсом можна визначити за виразом:

$$P(t) = \frac{\gamma}{100}. \quad (146)$$

Тоді пропущений тоннаж, що відповідає гамма-процентному ресурсу, отримуємо як

$$T_\gamma = \left[\frac{\omega_{\text{гр}}}{m_\alpha + U_p \alpha_1 T^{(\beta_1 - \beta)}} \right]^{1/\beta}, \quad (147)$$

де U_p – квантиль при конкретних значеннях імовірності відмов або безвідмовної роботи (Д.5).

Це напрацювання, за якого, наприклад, тільки на $(100 - \gamma)$ процентах кілометрів відмови рейок не перевищать $\omega_{\text{гр}}$. З обробки даних щодо виходу рейок відомо, що $v_\alpha = 0,45$. Звідси отримуємо:

$$T_{\gamma} = \left[\frac{\omega_{\text{гр}}}{m_{\alpha} (1 + 0,45U_p)} \right]^{1/\beta}. \quad (148)$$

Граничне значення накопиченого виходу рейок згідно з Положенням про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України нормується залежно від категорії колії. Результати зведено до табл. 4.3.

Емпіричні залежності також використовують для прогнозування відмов рейок [13, 14]. Так, накопичений вихід рейок при напрацюванні тоннажу T , млн т бр., визначається залежністю

$$\omega(t) = K_p K_R K_K \alpha T^{\beta}, \quad (149)$$

де K_p – коефіцієнт, що враховує вплив осьових навантажень на

строк служби рейок, $K_p = \left(P_{\text{с.о}}^{\text{ст}} / P_{\text{с.о}}^{\text{сер}} \right)^{\gamma}$ ($P_{\text{с.о}}^{\text{ст}}$ – стандартне середнє осьове навантаження рухомого складу, за якого визначено параметри функції, $P_{\text{с.о}}^{\text{ст}} = 160$ кН; $P_{\text{с.о}}^{\text{сер}}$ – середнє осьове навантаження рухомого складу на ділянці, що розглядається; γ – емпіричний параметр);

K_R – коефіцієнт, що враховує вплив плану ділянки на термін служби рейок, $K_R = \left(R_0^{\text{ст}} / R_{\text{сер}} \right)^{\delta}$ ($R_0^{\text{ст}}$ – стандартний радіус, за якого визначено параметри функції. Зазвичай приймають $R_0^{\text{ст}} = 1000$ м, оскільки в кривих такого радіуса вихід рейок суттєво не відрізняється від прямих ділянок; $R_{\text{сер}}$ – середньозважений радіус кривих на ділянці, що розглядається; δ – емпіричний показник степеня);

K_K – коефіцієнт, що враховує якість відремонтованих рейок.

Параметри для визначення гамма-процентного ресурсу рейок

Розрахункові параметри	Безстикова конструкція			Ланкова конструкція				
	I–III	IV (до 30), V (більше 15)	V (до 15), VI та VII (більше 5)	станційні	I–III	IV (до 30), V (більше 15)	V (до 15), VI та VII (більше 5)	станційні
	Поодинокий вихід рейок (кількість дефектних місць) у сумі з початку укладання в середньому на ділянці, шт./км	3	4	8	10	5	6	10
Імовірність безвідмовної роботи	0,9625	0,95	0,9	0,875	0,9375	0,925	0,875	0,85
Квантиль нормального розподілу	1,781	1,645	1,44	1,15	1,518	1,44	1,15	1,036
Знаменник у формулі (148)	1,781 m_{α}	1,645 m_{α}	1,440 m_{α}	1,150 m_{α}	1,518 m_{α}	1,440 m_{α}	1,150 m_{α}	1,036 m_{α}

Середній термін служби можна визначити за залежністю:

$$T_{\text{сер}} = \left(\frac{\omega_{\text{гр}}}{K_P K_R K_K \alpha} \right)^{1/\beta}. \quad (150)$$

А якщо відомі умови для початкових параметрів, то для зміни умов термін служби рейок прогнозують за виразом:

$$T_{\text{сер}2} = T_{\text{сер}1} K_P K_R K_K. \quad (151)$$

Зміни терміну служби рейок у кривих за зносом запропоновано визначати з допомогою таких залежностей, що отримані з експериментальних даних [14], у яких за основу процесу прийнято знос, що відбувається за таких умов: крива радіусом $R = 400$ м, середнє осьове навантаження $P = 170$ кН/вісь, твердість рейок 350 НВ, ухил повздовжнього профілю $i = 9$ ‰ за відсутності лубрикації. Експериментально одержана залежність бокового зносу рейок за вказаних умов:

$$h_{\text{б}} = 0,07T. \quad (152)$$

Інші умови експлуатації враховуються відповідними коефіцієнтами.

Основним фактором, що впливає на знос рейок, є радіус кривої, тому за експериментальними даними отримано залежність інтенсивності бокового зносу від радіуса:

$$K_R = \left(\frac{400}{R} \right)^2. \quad (153)$$

Важливим фактором, що позначається на інтенсивність бокового зносу, є осьові навантаження рухомого складу. За апроксимацією експериментальних даних маємо такий вираз:

$$K_P = \left(\frac{P}{170} \right)^{0,55}. \quad (154)$$

Третім впливовим фактором є твердість рейок. Згідно з нормативними документами цей показник може коливатися в межах 321...401 НВ. За апроксимацією експериментальних даних отримано такий вираз:

$$K_{\text{НВ}} = \left(\frac{350}{\text{НВ}} \right)^{3,5}. \quad (155)$$

Вплив крутизни ухилів поздовжнього профілю враховують таким коефіцієнтом:

$$K_i = \left(\frac{i}{9} \right)^{0,3}. \quad (156)$$

При лубрикації відбувається зменшення інтенсивності бокового зносу рейок. Значення коефіцієнта, що враховує змащування рейок, перебуває в межах $K_3 = 0,5 \dots 0,9$. Значення $K_3 = 0,5$ можна отримати у разі встановлення лубрикаторів на початку кожної кривої з безперервним їх функціонуванням. Зазвичай $K_3 = 0,8 \dots 0,9$.

Таким чином інтенсивність бокового зносу рейок залежно від розглянутих факторів:

$$h_{\text{б}} = 0,07TK_p K_R K_{\text{НВ}} K_i K_3. \quad (157)$$

Термін служби рейок у кривих за зносом можна визначати з допомогою залежності

$$T = \frac{h_{\text{б}}}{0,07 K_p K_R K_{\text{НВ}} K_i K_3} \quad (158)$$

4.6. Життєвий цикл надійності залізничної колії

Колія – багатоелементний об'єкт надійності, що ремонтується й відновлюється. Він резервований за основним несучим елементом верхньої будови колії – рейкою – і має навантажувальне резервування за елементами рейкової основи. Іншими словами, відмова рейки

є відмовою колії в цілому, а відмова якого-небудь елемента рейкової основи, наприклад шпали, підкладки, скріплення, не є відмовою колії, тому що сусідні елементи сприймають навантаження на себе і цим забезпечують навантажувальне резервування. Залізнична колія як об'єкт надійності має дві характерні риси: велику довжину й необхідність відновлення працездатного стану після відмови на місці в умовах її функціонування.

У кількісній оцінці параметром надійності є середній інтервал часу (t) при перевезеній масі (Q) за умови, що конструкція верхньої будови колії виконує свою роль способом, зумовленим умовами експлуатації. Тут поняття надійності точно збігається з поняттям довговічності, під якою мається на увазі здатність конструкції зберігати працездатність до граничного стану в конкретних умовах експлуатації. Довговічність верхньої будови колії може бути виражена часом або перевезеною масою; ці величини називають відповідно терміном служби або напрацюванням.

Втрата верхньою будовою колії заданих якостей може мати характер зношування або несправності.

Зношування верхньої будови колії – це необоротні небажані зміни її стану, що відбуваються в ході експлуатації поступово або стрибкоподібно, у результаті чого термін виконання заданих функцій вичерпується.

Несправність верхньої будови колії (її елементів) – це небажана зміна її стану, що миттєво виникає в ході експлуатації, у результаті чого вона різко втрачає здатність виконувати задані функції. Ці функції варто розглядати ширше, ніж можливість руху поїздів з допустимою швидкістю. Хоча, наприклад, злам одного стикового болта рейкового скріплення і є несправністю, він не обмежує швидкості руху поїздів.

Залізнична колія в процесі експлуатації перебуває в одному з п'яти станів надійності (рис. 11), а саме:

I. Стан колії без відступів від норм і допусків її устрою й утримання (справний стан).

II. Стан колії з відступами від норм і (або) допусків її устрою й (або) утримання, але в цілому працездатний (несправний, але в цілому працездатний стан).

III. Стан колії з відступами від норм і (або) допусків її устрою й (або) утримання, але частково працездатний, тобто з місцевим

обмеженням швидкості руху поїздів (несправний, але частково працездатний стан).

IV. Непрацездатний, але неграничний стан колії (місцева повна відмова, що потребує огороження сигналами зупинки до відновлення працездатного стану).

V. Граничний стан колії (подальша експлуатація небезпечна без суцільного капітального ремонту, модернізації або реконструкції).

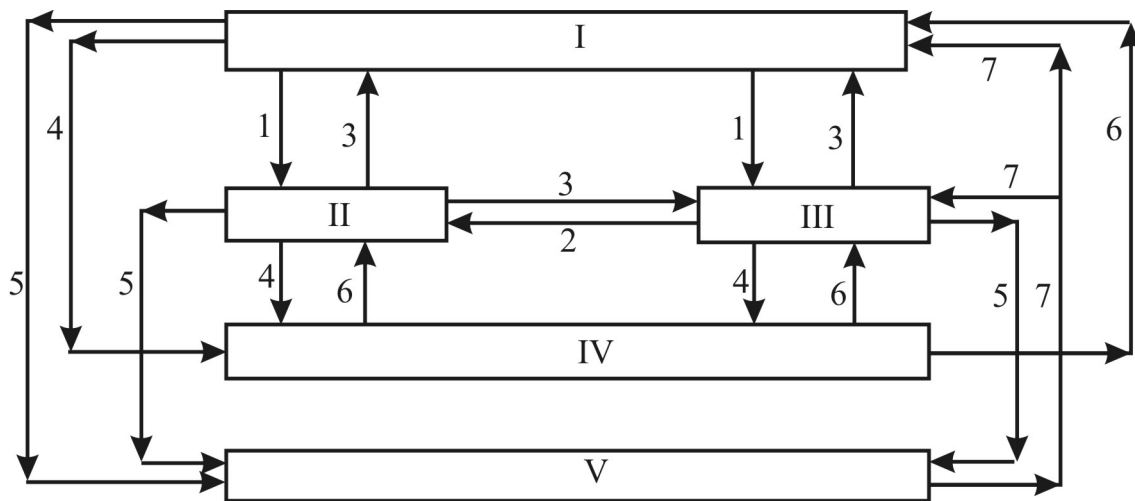


Рис. 11. Структурна схема основних станів колії

Кожний із зазначених п'яти технічних станів колії характеризується сукупністю кількісних значень її параметрів і якісних ознак. Номенклатура цих параметрів і ознак, а також межі їхніх допустимих значень установлені чинною нормативно-технічною документацією Укрзалізниці.

Якщо в процесі експлуатації стан I надійності колії переходить у стан II, то ця подія називається ушкодженням (див. рис. 11). Якщо стан I або II переходить у стан III, тобто в несправний, але частково працездатний (з обмеженням швидкості руху поїздів), то ця подія називається частковою відмовою. Якщо ж стан I, II або III переходить у стан IV, тобто непрацездатний стан, маємо повну відмову.

Прикладом стану I надійності колії є оцінка її стану вагоном-колівимірювачем у нуль балів. Стан II відповідає відступам першого, другого і третього (якщо кількість відступів третього ступеня менше семи на 1 км) ступенів, тобто такий стан рейкової колії виходить за межі допусків устрою й утримання і штрафується визначеною кількістю балів, але колія при цьому є цілком працездатною

(швидкість не обмежується). Стан III надійності з утримання рейкової колії відповідає відступам третього ступеня при кількості відступів більше шести на 1 км, четвертого ступеня, коли обмежується швидкість. Стан IV – відступам, за яких пропуск поїздів не допускається.

У граничний стан надійності (стан V) колія переходить, залишаючись частково чи цілком працездатною, тобто зі станів III і II. Для колії відповідно до Держстандарту 27.002–89 і методичних указівок «Надійність техніки. Поїзд і загальні правила задання вимог до надійності» характерні три граничних стани надійності: 1 – у разі настання якого виконують комплексно-оздоровчий ремонт (КОР), 2 – у разі настання якого виконують середній ремонт, і 3 – у разі настання якого виконують капітальний ремонт, модернізацію або реконструкцію (повну заміну рейко-шпальної решітки). На незасмічених вантажонапружених ділянках у низці випадків КОРи і навіть середні ремонти не виконують, тому що (за станом баласту, шпал і скріплень між суміжними капітальними ремонтами) забезпечується працездатність колії і граничний стан з позиції надійності не настає. Зміна станів надійності колії від гіршого до кращого здійснюється за допомогою її ремонтів, операцій відновлення остаточно або частково працездатного стану й усунення несправностей (ушкоджень, розладів) бригадами поточного утримання або спеціалізованими ремонтними підрозділами.

Схема переходу залізничної колії з одного стану в інший наведена на рис. 11. Цифри на рис. 11 означають:

1 – нагромадження ушкоджень. Усі існуючі конструкції колії експлуатуються в умовах нагромадження місцевих пластичних деформацій та інших ушкоджень практично в усіх елементах: у верхній частині головки рейок, у прокладках між рейками і шпалами, у шпалах під підкладками й у зонах їхніх контактів із щебенем, у баластному шарі й у верхній частині земляного полотна. Крім того, у процесі експлуатації стираються (зношуються) контактні зони елементів колії; послабляються з'єднання рейок зі шпалами; знижується несуча здатність шпал унаслідок старіння; утворюються «виплески» й ослаблення баластового шару через його засмічення; нагромаджуються розлади колії в плані, профілі й по ширині колії, а в рейках (особливо у верхній частині їхньої головки й у шийці в зонах накладок) нагромаджуються й розвиваються тріщини від утомленості. Швидкість

розвитку всіх зазначених процесів нелінійно зростає зі збільшенням напруження після ремонту колії;

2 – часткова відмова колії, що полягає в місцевому частковому порушенні працездатного стану колії, у результаті якого потрібне місцеве обмеження швидкості;

3 – поточне утримання (технічне обслуговування) колії;

4 – повна відмова колії;

5 – перехід колії в граничний стан;

6 – відновлення працездатного стану колії;

7 – капітальний, середній чи комплексно-оздоровчий ремонт колії.

Контрольні запитання та завдання

1. Наведіть графік потоку відмов для об'єктів, що ремонтуються та відновлюються в процесі використання.
2. Наведіть графік потоку відмов для об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання.
3. Які показники надійності використовуються для об'єктів, що ремонтуються та відновлюються в процесі використання?
4. Які показники надійності використовуються для об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання?
5. Які періоди роби об'єкта вам відомі?
6. На які групи поділяються об'єкти, що відновлюються та ремонтуються в процесі використання?
7. Які групи параметрів надійності вам відомі?
8. Однакові чи ні залежності між об'єктами різних видів у одній групі? Чому?
9. Однакові чи ні залежності між групами параметрів надійності для одного виду об'єктів? Чому?
10. За якими критеріями класифікуються резервовані системи?
11. Як класифікуються резервовані системи за реакцією на появу відмов? за навантаженням на резервні елементи? за принципами обслуговування? за видом резервної схеми?
12. Наведіть структурну схему поєднання елементів при послідовному з'єднанні елементів; при паралельному навантаженому з'єднанні елементів; при паралельному ненавантаженому з'єднанні елементів.

Оцінка та прогнозування надійності роботи рейок

5.1. Аналіз відмов рейок з погляду надійності

Робота рейки як об'єкта колії є складним процесом. Рейка приймає навантаження безпосередньо від рухомого складу й передає їх на інші елементи колії. Напруження і деформації, які виникають у рейці, залежать від багатьох факторів, у тому числі й від властивостей підрейкової основи. Існує декілька моделей, які розв'язують ті чи інші завдання, пов'язані з роботою рейки, серед яких і завдання забезпечення її надійності. Навіть на сьогодні процес розробки та удосконалення моделей рейки ще триває. У цьому розділі показані деякі існуючі методи визначення надійності роботи рейки, які базуються на загальних принципах теорії надійності, викладених у попередніх розділах, та накопиченій статистичній інформації і доведені до можливості виконання практичних розрахунків. У разі суттєвої зміни експлуатаційних характеристик (насамперед, осьового навантаження та швидкостей руху) або характеристик колії (введення нових конструкцій) ці положення повинні бути переглянуті.

Залізнична рейка в процесі експлуатації, як і всі інші елементи, має три види відмов, що властиві трьом періодам експлуатації (рис. 12): припрацювальні, раптові й поступові.

У рейках процес припрацювання в початковий період експлуатації відображується в підвищенні інтенсивності зносу головки. Оскільки рейка має великий запас металу в головці на знос та резерви несучої здатності, процес припрацювання звичайно не викликає припрацювальних відмов. Але порушення технології виготовлення може призвести до наявності раковин, волосовин, плен та інших дефектів (дефекти 10, 20, 70 [15]).

У період нормальної експлуатації можуть виникати раптові відмови. Вони не залежать від часу експлуатації та стану рейок, а пов'язані з перевантаженням вагонів, несправністю ходових частин рухомого складу, наявністю повзунів на поверхні кочення коліс, пробуксовуванням локомотивів, осіданням рейкової основи тощо. Більшість рейок витримують перевантаження, але якщо в них уже є дефекти, це знижує їх несучу здатність, що може призвести до швидкого розвитку дефектів або навіть до руйнування рейки (дефекти 14, 24, 25, 65, 74 [15]).

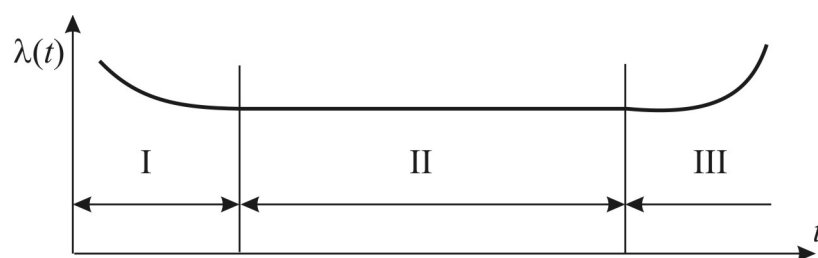


Рис. 12. Зміна інтенсивності відмов залежно від напрацювання:
I – припрацювання; II – період нормальної експлуатації; III – період старіння

Інтенсивність раптових відмов приблизно постійна в період нормальної експлуатації. Але слід зауважити, що ймовірність раптових відмов мала (з дотриманням умов експлуатації залізничної колії), тому на надійність роботи рейок у цілому ці відмови не впливають.

Після періоду нормальної експлуатації йде період зростання інтенсивності поступових відмов, що є наслідком старіння рейок. Це викликано накопиченням незворотних процесів, що є причиною зміни міцнісних характеристик рейок. До них належать: механічний знос та зім'яття поверхні кочення головки рейки, корозія (дефекти 40–49 та 59 [15]), дефекти, що виникають у результаті процесу втомленості, серед яких переважають контактні-втомлені (11, 21 [15]). У цей період виникають як раптові, так і поступові відмови. Зростання інтенсивності таких відмов призводить до зниження безпеки руху поїздів, ускладнює поточне утримання, тому виконують роботи із заміни таких рейок. Таким чином, довговічність рейок визначається поступовими відмовами (від зносу та втомленості), тобто дефектами втомного походження та величиною приведенного зносу.

5.2. Витривалість та ресурс рейок

5.2.1. Раптові відмови

Під витривалістю рейки мається на увазі властивість чинити опір процесам втомленості. Рейка витримує навантаження від коліс, яке являє собою циклічний знакозмінний процес з певним коефіцієнтом асиметрії $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ (рис. 13).

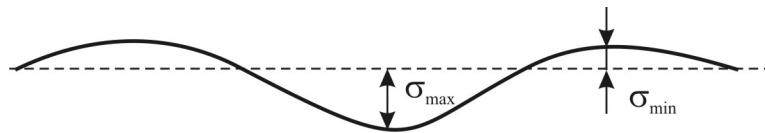


Рис. 13. Асиметричний цикл напруження в рейках:

σ_{\max} , σ_{\min} – відповідно максимальна та мінімальна амплітуди напружень у рейках

Довговічність вимірюється кількістю циклів навантаження з коефіцієнтом асиметрії r , що витримає рейка до відмови N_r .

Графічно ця залежність має вигляд експоненти $\sigma_r = \log N_r$ (рис. 14).

Для рейки типу Р65 без термозміцнення $N_r = 1,08 \cdot 10^6$; Р65 з термозміцненням $N_r = 0,58 \cdot 10^6$.

Практично $N_{r=0} = 10^{12} \dots 10^{16}$ циклів за рахунок процесів корозії, електро- і термохімічних процесів та інших факторів.

Причинами раптових відмов рейки є наслідки контактних напружень. Ці напруження мають найбільші значення на глибині 5–12 мм у зоні, що розташована на відстані 8–12 мм від бокової грані головки рейки. Якщо в цій області є порушення в товщі металу (волосовини, вкраплення розкиснювача), то з'являються мікротріщини, які призводять до виникнення дефектів контактної-втомленої природи.

Для оцінки довговічності недостатньо знати одноразову межу витривалості, яка визначається в розрахунках колії на міцність. Необхідно мати оцінку тривалої міцності.

Динамічні напруження σ_d (σ_1 , σ_r , $\sigma_{r=0}$) є поточними випадковими величинами, які мають свої статистики: $\overline{\sigma_d} = \overline{\sigma_r}$ середнє значення (математичне сподівання) випадкової величини та середнє

квадратичне відхилення S_d (міра відхилення від середнього). Межа тривалої міцності $[\sigma]$ також описується статистиками $[\bar{\sigma}]$ та $S_{[\sigma]}$.

Під час розрахунків міцності колії закладається виконання вимоги, яка полягає в тому, що колія в будь-якому перерізі в будь-який час повинна бути міцною. Для цього необхідно, щоб напруження, які виникають у різних елементах колії, не перевищували допустимих значень, тобто виконувалася умова тривалої міцності

$$\bar{\sigma}_{r-o} \leq [\bar{\sigma}]. \quad (159)$$

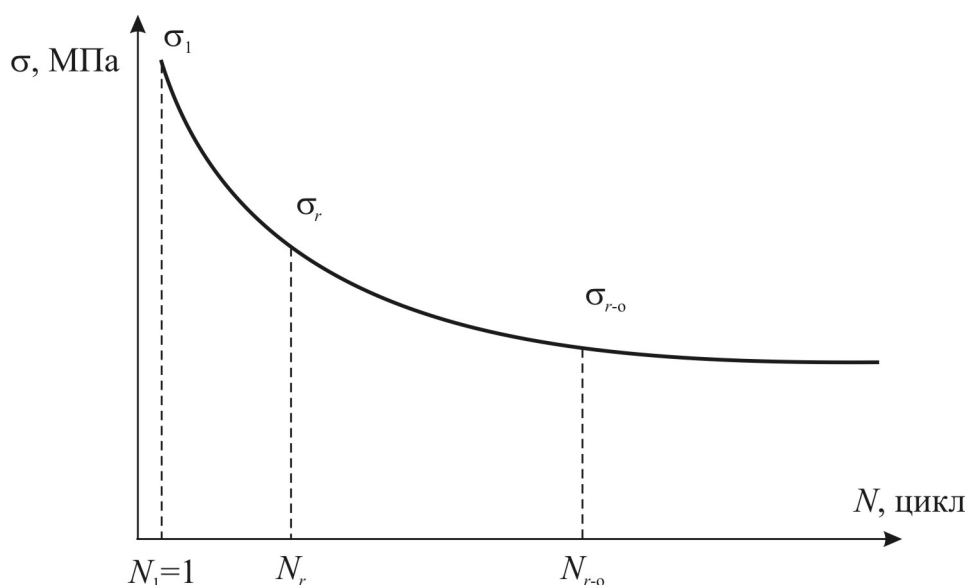


Рис. 14. Залежність витривалості від кількості циклів навантаження:

$N_1 = 1$ – одноразова межа витривалості; N_r – обмежена межа витривалості; N_{r-o} – тривала межа витривалості, $N_{r-o} \rightarrow \infty$; σ_1 – напруження, за якого рейка відмовить у першому циклі навантаження; σ_r – напруження, за якого рейка витримає до відмови обмежену кількість циклів навантаження N_r ; σ_{r-o} – напруження, за якого рейка теоретично не має відмови при будь-якій кількості циклів навантаження N_{r-o} .

На практиці для опису напружень застосовують нормальний закон розподілу з кінцевими значеннями кривих σ_{\min} та σ_{\max} , а теоретична крива своїми кінцями прямує у нескінченність. У розрахунках колії на міцність не має необхідності розглядати всю криву $-\infty \leq \sigma \leq \infty$, а достатньо обмежитися її частиною в межах відхилення від серед-

нього значення σ_d на величину $\pm \lambda_\phi S$, де λ_ϕ – нормувальний множник для заданого рівня ймовірності. Якщо $\Phi = 0,994$, то $\lambda_\phi = 2,5$, якщо $\Phi = 0,999$ – $\lambda_\phi = 3$.

Тоді умову тривалої міцності можна записати як

$$\overline{\sigma}_d + \lambda_\phi S \leq [\overline{\sigma}], \quad (160)$$

$$S = \sqrt{S_{[\sigma]}^2 + S_d^2}, \quad (161)$$

$$\overline{\sigma}_d + \lambda_\phi \sqrt{S_{[\sigma]}^2 + S_d^2} \leq [\overline{\sigma}]. \quad (162)$$

У практичних розрахунках колії на міцність приймається для рейок без термозміцнення $[\sigma] = 350$ МПа, для термозміцнених рейок $[\sigma] = 400$ МПа, тобто умови надійності–довговічності враховуються непрямым чином.

За експлуатаційних умов рейками рухаються екіпажі з різними осьовими навантаженнями, різною швидкістю й різними параметрами. Тому в рейках з'являються напруження різної величини: як $\sigma_r > \sigma_{r-0}$, так і $\sigma_r \leq \sigma_{r-0}$, і робота рейки здійснюється в умовах обох меж витривалості.

Загальна кількість циклів навантаження N_r стосується умови тривалої межі витривалості $\sigma_r \leq \sigma_{r-0}$, кількість циклів обмеженої витривалості n_{r-j} стосується умови обмеженої межі витривалості $\sigma_r > \sigma_{r-0}$.

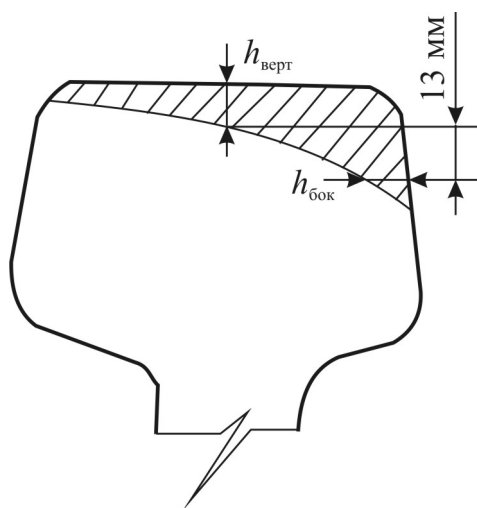
Відношення обмеженої кількості циклів до загальної $\frac{n_{r-j}}{N_r}$ є часткою використання витривалості. Якщо $\sum \frac{n_{r-j}}{N_r} = 1$, то витривалість використана повністю. При цьому повна кількість циклів $\int_0^{n_0} \frac{dn}{N_r} = 1$.

Межа n_0 і є довговічністю – повною кількістю циклів навантаження.

Але за умов безпеки неможливо повністю вичерпати цей ресурс. Необхідно встановити граничний стан (пропущений тоннаж), за яким передбачена кількість відмов N_p не буде перевищувати заданого

рівня (наприклад, 5 %). Це і буде ресурс рейок. Зараз умовно приймається для рейок типу Р65 без термозміцнення тоннаж $T = 500$ млн т бр., для рейок з термозміцненням $T = 700 \dots 750$. У середньому цей тоннаж відповідає відмовам 5–6 рейок на 1 км із умови достатнього часу між змінами рейок на одній ділянці.

5.2.2. Поступові відмови рейок



Головною причиною поступових відмов рейок є знос головки рейки, через який також обмежується термін експлуатації рейок, особливо в кривих з радіусами $R \leq 650$ м.

Знос головки має складну форму. Спрощено його можна поділити на вертикальний і горизонтальний (боковий).

У розрахунках строку служби рейок за зносом використовується так званий приведений знос (рис. 15).

Рис. 15. Знос головки рейки

$$h_{\text{прив}} = h_{\text{верт}} + 0,5h_{\text{бок}}. \quad (163)$$

Допустимі значення приведенного зносу, мм, за умовами експлуатації становлять:

При швидкості руху $V = 160-200$ км/год.....	6
При швидкості руху $V = 141-160$ км/год.....	8
При швидкості руху $V = 121-140$ км/год.....	9
При швидкості руху $V \leq 120$ км/год	
та $\Gamma > 10$ млн т км бр./км рік	12
При $\Gamma \leq 10$ млн т км бр./км рік	16
На приймально-відправних коліях	20

Згідно з правилами площа зносу не повинна перевищувати деякого допустимого значення:

$$\omega \leq [\omega]. \quad (164)$$

Значення $[\omega]$ визначається як площа умовного прямокутника

$$[\omega] = h_{\text{прив}} b - \varepsilon, \quad (165)$$

де b – розрахункова ширина головки рейки, мм;

ε – поправка на відхилення форми головки від прямокутника,
 $\varepsilon = 70$ мм.

У сучасних умовах, коли на поверхні кочення рейок наявний хвиляподібний знос, треба виконувати періодичне шліфування (рис. 16).

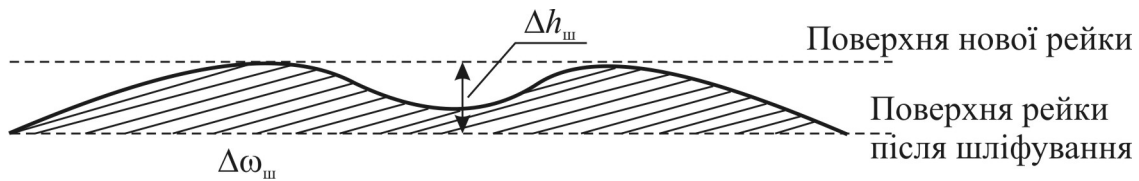


Рис. 16. Геометричні характеристики шліфування

Допустима глибина западин $\Delta h_{\text{ш}}$, мм, становить:

При $V \leq 70$ км/год..... 3

При $V \leq 100$ км/год..... 2

При $V \leq 120$ км/год..... 1,5

При $V > 120$ км/год..... 1

Для кількості шліфувань $j_{\text{ш}}$ глибиною $\Delta h_{\text{ш}j}$ площею $\Delta \omega_{\text{ш}j}$ можна розрахувати допустиму площу зносу рейки:

$$[\omega_n] = [\omega] - \Delta \omega_R - \sum_{j=1}^j \Delta \omega_{\text{ш}j}, \quad (166)$$

де $\Delta \omega_R$ – зміна площі зносу в кривих;

$\sum_{j=1}^j \Delta \omega_{\text{ш}j}$ – зашліфована площа.

Поточне значення площі зносу

$$\omega = \beta T, \quad (167)$$

де β – питомий знос, мм²/млн т бр.

Тоді значення пропущеного тоннажу до суцільної заміни рейок визначається як

$$T = \omega/\beta. \quad (168)$$

Питомий знос головки рейки за рахунок дії коліс:

$$\beta = \beta_k = \beta_{k-o} \lambda c k n_{\psi}, \quad (169)$$

де λ – вплив радіуса кривої;
 c – вплив конструкції колії;
 k – якість рейкової сталі: для рейок без термозміцнення $k = 1$ та з термозміцненням $k = 0,5 \dots 0,7$;
 n_{ψ} – коефіцієнт зчеплення коліс із рейками: у звичайних умовах $n_{\psi} = 1$, за наявності ожеледиці $n_{\psi} = 0,85$; при низьких температурах $n_{\psi} = 0,67$.

$$\beta_{k-o} = 1,3 \frac{P_k}{r_k} (1 + 9S^2), \quad (170)$$

де P_k – статичне колісне навантаження, $P_k = P_{ст}$;
 r_k – радіус колеса;
 S – відносне ковзання колеса по рейці, $S = 0,04 \dots 0,06$.

$$c = 0,5 + 11\,600 \frac{\kappa}{U}, \quad (171)$$

де κ – твердість основи $0,012 \dots 0,015 \text{ см}^{-1}$;
 U – модуль пружності підрейкової основи, кгс/см^2 .

$$\lambda = \frac{900}{R} + \frac{100\,000}{R^2} \alpha_{\text{люб}}. \quad (172)$$

5.3. Імовірнісні моделі параметрів надійності рейок

Уже зазначалося, що математичні моделі являють собою опис основних властивостей явищ і процесів мовою математичних формул, логічних виразів, функцій, рівнянь та інших математичних засобів (див. п. 2.1), тому, щоб розв'язати будь-яку задачу зі знаходження показників надійності, необхідно скласти математичну модель.

З позиції надійності робота рейки може бути описана великою кількістю математичних моделей залежно від поставленої задачі. Так, щоб знайти параметри безвідмовності, під час розгляду рейки як невідновлюваного об'єкта, достатньо виконати такі самі розрахунки, як у другому розділі. Їх здійснюють тільки під час розгляду раптових відмов рейки.

Якщо мова йде про безстикову рейкову пліть, що складається з множини рейок, то тоді робота рейок буде оцінюватись як для відновлюваних об'єктів і математична модель буде складатися відповідно до відомостей, наведених у п 1.2.2.2.

Контрольні запитання та завдання

1. Які періоди експлуатації властиві елементам?
2. Які відмови відбуваються в початковий період експлуатації?
3. Яку назву має початковий період експлуатації в теорії надійності?
4. Які відмови відбуваються в період нормальної експлуатації?
5. Наведіть приклади відмов елементів у різні періоди експлуатації.
6. Поясніть термін «витривалість».
7. Які відмови відбуваються у ході розгляду процесу витривалості?
8. Яке напрацювання розглядають під час дослідження процесу витривалості?
9. Поясніть залежність витривалості від кількості циклів навантаження.
10. Поясніть сутність процесу появи поступових відмов.
11. Поясніть термін «приведений знос рейок».
12. Поясніть термін «площа зносу рейок»?

Оцінка та прогнозування надійності роботи елементів підрейкової основи

Імовірнісна модель надійності скріплень. У розрахунку показників надійності рейкових скріплень розглядають структурні схеми роботи цих скріплень з позиції надійності, які можуть мати як послідовні, так і паралельні зв'язки між елементами скріплення (див. п. 4.4).

Імовірнісна модель надійності шпал. Досвід показує, що дерев'яні шпали, які експлуатуються приблизно в однакових умовах, за однакових обсягів перевезень відмовляють у різний час внаслідок суттєвого розкиду властивостей міцності деревини, якості обробки антисептиками, умов опору на баласт, наявності нерівностей на поверхні кочення рейок, у тому числі й стиків. Отже, пошкодження шпал – випадковий процес, а пропущений тоннаж до відмови шпал – випадкова величина. Тому можна застосовувати моделі нормального розподілу: відмови шпал викликаються багатьма факторами, кожний з яких впливає певним чином на розвиток дефектів; зі зростанням напруження збільшується інтенсивність відмов шпал, тобто теоретичний розподіл має монотонно зростаючу функцію інтенсивності відмов.

Обробляючи дані про відмови шпал, необхідно враховувати, що на вантажонапружених ділянках тривалість експлуатації колії скорочується, і можна отримати дані про напруження до відмови тільки частини шпал, тобто маємо справу з обмеженою кількістю даних.

Вихідна інформація про відмови шпал збирається з відомостей кілометрового обліку заміни шпал та за звітами про наявність у колії непридатних шпал. Під час проведення статистичних експериментів виконуються такі умови: дані про відмови шпал збираються на ділянках, що характеризуються певним набором основних властивостей (вантажонапруженість, навантаження на вісь, швидкість руху поїздів, конструкція верхньої будови, параметри плану та профілю колії).

Імовірнісна модель надійності баластного шару. Стан баластного шару прийнято оцінювати засміченням щебеню, протяжністю колії з виплесками забрудненого щебеню у шпал або кількістю відступів за показниками вагона-колієвимірвача. Найбільш просто й зрозуміло оцінювати стан баласту за часткою протяжності колії з виплесками

$$F(t_i) = \frac{m(t_i)}{1000}$$

де $m(t_i)$ – протяжність колії з виплесками в метрах у момент часу або напрацювання t_i .

За результатами спостережень будується впорядкований ряд $m(t_i)$ в міру зростання t_i , визначається ймовірність відмов – квантилі – $T_{\text{сер}}$ та σ_i . А за цими параметрами – напрацювання для різних часток протяжності колії з виплесками.

Контрольні запитання та завдання

1. Наведіть структурну схему для об'єктів, що виконують однакові функції.
2. Наведіть структурну схему для об'єктів, що виконують різні функції.
3. Наведіть структурну схему для об'єктів що не ремонтуються та не відновлюються в процесі використання.
4. Наведіть структурну схему для об'єктів, що дублюють один одного.
5. Наведіть структурну схему для об'єктів, що ремонтуються та відновлюються в процесі використання.
6. Наведіть структурну схему для об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання.
7. Які показники надійності використовуються для об'єктів, що не ремонтуються та не відновлюються в процесі використання?
8. Які показники надійності використовуються для об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання?

Оцінка надійності роботи безстикової колії

7.1. Моделювання стійкості безстикової колії

На сьогодні існує кілька методів оцінки напружено-деформованого стану рейкових плітей: починаючи з візуального огляду і закінчуючи застосуванням сучасних вимірювальних пристроїв. За багаторічний термін розвитку та удосконалення теорії температурного напруженого стану безстикової колії було створено декілька принципово різних методів розрахунку величин поздовжніх критичних сил у рейках. Назвемо найбільш поширені з них.

Метод диференціальних рівнянь. Полягає в розв'язанні диференціального рівняння викривлення рейко-шпальної решітки під дією поздовжніх температурних сил. Найбільш повну реалізацію метод набув у дослідженнях А. Я. Когана, які були продовжені А. В. Лебедевим.

Метод імітаційного моделювання. На підставі рівняння обрису осі пружної вигнутої балки М. Ф. Веріго була розроблена модель стійкості безстикової колії, у якій застосовані елементи врахування динаміки розвитку процесу втрати стійкості від дії поздовжніх і вертикальних сил.

Метод кінцевих/граничних елементів. На сьогодні метод кінцевих елементів широко застосовується в різних фізико-математичних задачах. В основному це моделювання напруженого стану конструкцій та пружних середовищ. Усе частіше з'являються роботи щодо використання методу кінцевих елементів для розв'язання задач стійкості безстикової колії. Це, наприклад, модель безстикової колії Безрукова–Ісаєнко, Сулова–Покацького та низка інших розробок.

Енергетичний метод розрахунку. При цьому методі прирівнюється до нуля сума елементарних робіт (узагальнених сил) або знаходиться екстремум потенціальної енергії системи. Результатом є зна-

чення критичної стискальної сили. Широкого застосування метод набув у результаті роботи С. П. Першина. Надалі енергетичний метод було розвинено в працях В. І. Новаковича.

Усі вказані методи визначення стійкості безстикової колії проти викиду базуються на складних фізико-математичних моделях, виконання розрахунків за якими потребує застосування громіздкого математичного апарату й унеможлиблює їх використання в такому вигляді на рівні інженерних розрахунків. Тому, як правило, галузеві інструкції щодо питань утримання безстикової колії містять результати досліджень у вигляді конкретних числових рекомендацій стосовно температурних режимів безстикової колії для певних варіантів конструкції і умов експлуатації, а не самі методики. Це може обмежувати інженера в прийнятті обґрунтованого рішення, особливо в умовах відмінності вихідних параметрів від стандартних.

Детальніше розглянемо енергетичний метод визначення стійкості безстикової колії. При певній величині стискання потенціальна енергія, яка накопичується в рейках, стає настільки великою, що рейкошпальна решітка в заданому положенні стає нестійкою. Наслідком цього може бути викид колії вбік або угору, який супроводжується звільненням «залишкової» потенціальної енергії. За рахунок цієї енергії відбувається різкий вигин рейок, при якому долається вага рейкошпальної решітки, опір баласту й інші фактори, завдяки чому енергія стискання зменшується. Її запас у рейках остаточно деформованої колії відповідає новому стану стійкої рівноваги між факторами протидії викривленню та стискальній силі, яка має значно меншу величину. Таким чином, розрахунок стійкості зводиться до визначення умов рівноваги стиснутої поздовжніми силами рейкошпальної решітки й величини останніх.

Професором Першиним була запропонована методика, яка встановлює зв'язок між стискальною силою і її проявом у вигляді вигину ділянки рейки певної довжини на певну стрілу вигину. В остаточно-му вигляді повна формула для визначення сили, яка приводить до вигину ділянки рейки довжиною l на стрілу вигину Δf , має вигляд

$$P = \frac{48,446 \frac{EI\Delta f}{l^2} + 0,078l^2\xi_1c\Delta f^n + \frac{2m_0}{a}\xi_2l\left(\frac{\Delta f}{l}\right)^k}{\Delta f + f_0 + 0,078\frac{l^2}{R}}, \quad (173)$$

- де E – модуль пружності рейкової сталі;
 I – момент інерції рейко-шпальної решітки відносно горизонтальної осі;
 Δf – стріла від додаткового вигину, що виникає внаслідок появи стискальних сил;
 l – довжина хорди викривлення, якою замінюють довжину викривленої частини пліті;
 ξ_1, ξ_2 – емпіричні коефіцієнти, що залежать від значень n і k ;
 c – модуль деформації (аналог сили, що прикладена до одиниці довжини балки та викликає зміщення на одиницю);
 n – коефіцієнт, що виражає відношення повної довжини деформованої ділянки до довжини скривленої частини;
 k – коефіцієнт, що враховує форму пружної балки;
 m_0 – реактивний момент, який визначається залежно від затягування клеми;
 a – відстань між осями шпал;
 f_0 – стріла початкового викривлення, що характеризує стан колії;
 R – радіус кривої.

Унеможливлене безпосереднє застосування формули (173) те, що залишається невідомим, за яких саме значень довжини й стріли вигину деформація рейки буде незворотньою, тобто призведе до втрати стійкості. Для знаходження саме критичної сили потрібні варіантні розрахунки для всіх можливих значень l і Δf . У більшості випадків довжина хорди викривлення може коливатися у межах 3...16 м, стріла вигину – в межах 0,05...2,00 см. На початку процесу вигину, звичайно, для більшого викривлення потрібна більша стискальна сила. Для постійної довжини ділянки згину критична сила буде відповідати межі, за якою подальше викривлення потребуватиме меншої сили, ніж попереднє. Менша із сил, які відповідають такій межі для можливих значень довжини викривлення, і буде критичною силою, що може призвести до втрати стійкості безстикової пліті. Наочно процес визначення критичної сили показано на рис. 16 у вигляді залежності стискальної сили від стріли вигину рейки для різних довжин ділянки вигину для кривої з радіусом 600 м та початковою нерівністю 3 ‰.

Приклад вибірки результатів аналізу наведено в табл. 7.1, яка містить значення параметрів l і Δf , за яких спостерігається наявність критичної сили, для різних варіантів вихідних даних.

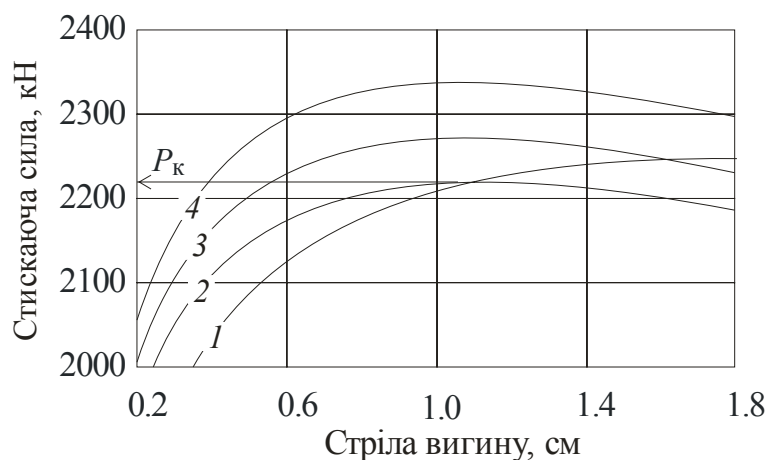


Рис. 16. Залежність стискальної сили від стріли вигину рейки для різних довжин ділянки вигину:
1 – 8 м; 2 – 9 м; 3 – 10 м; 4 – 11 м

Таблиця 7.1

Довжина хорди й стріла вигину ділянки згину при досягненні критичної сили залежно від параметрів колії

Радіус кривої, м	Вигин, см / довжина хорди, м при ухилі початкової нерівності, ‰		
	2,0	2,5	3,0
400	<u>1,00</u>	<u>1,25</u>	<u>1,50</u>
	10,0	10,0	10,0
600	<u>0,75</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
	8,0	7,0	7,0
800	<u>0,75</u>	<u>0,75</u>	<u>1,00</u>
	8,0	8,0	8,0
1000	<u>0,50</u>	<u>0,75</u>	<u>1,00</u>
	8,0	8,0	8,0

Для практичних розрахунків проф. С. П. Першиним була запропонована формула, отримана апроксимацією результатів багатоваріантних розрахунків

$$P_k = \frac{Ak_1k_2k_3}{K_c i^\alpha}, \quad (174)$$

де A і α – параметри, які залежать від типу рейки та плану лінії відповідно;

k_1 – коефіцієнт, що залежить від опору шпал зсуву поперек колії: при опорі 6,0 кН $k_1 = 1,17$; опорі 4,5 кН $k_1 = 1,0$; опорі 2,25 кН $k_1 = 0,71$;

k_2 – коефіцієнт, що залежить від епюри шпал: при епюрі 1 600 шт/км $k_2 = 0,91$, при 1 840 шт/км $k_2 = 1,0$; при 2 000 шт/км $k_2 = 1,07$;

k_3 – коефіцієнт, що залежить від зусилля затяжки клемних болтів. При $i = 2$ ‰ приймається рівним $k_3 = 0,9$; 1,0; 1,07 відповідно при затягуванні клемних болтів скріплень моментом 100, 200, 300 Нм. За тих же значень моментів і при $i = 3$ ‰ відповідно $k_3 = 0,95$; 1,0; 1,03;

K_c – коефіцієнт запасу на стійкість, у практичних розрахунках приймається 1,5;

i – середній ухил початкової нерівності, який приймається $i = 2$ ‰ для прямих ділянок колії і $i = 2,5 \dots 3$ ‰ для кривих з радіусом від 1 000 до 400 м відповідно.

У разі появи нових конструкцій колії або в інших умовах експлуатації виникає необхідність у корегуванні параметрів, що увійшли до формули (174). Наприклад, такі багатоваріантні розрахунки за формулою (173) виконувалися при введенні в експлуатацію на залізницях України рейок типу UIC60.

Значення параметрів A і α для практичних розрахунків за формулою (174) наведено в табл. 7.2.

Таким чином, більшість параметрів, що впливають на значення критичної сили, увійшли до формули (174) у вигляді коефіцієнтів, що створює певні межі застосування цієї формули й потребує інтерполяції для проміжних значень вихідних даних.

За результатами варіантних розрахунків було проведено аналіз і визначено, яких саме значень набувають довжина й стріла ділянки вигину залежно від різного співвідношення вихідних даних.

Параметри A і α для визначення критичної сили

Тип рейок	Параметр	Радіус кривої, м				
		400	600	800	1 000	∞
P65	A	2 480	3 150	3 610	3 830	5 830
	α	0,232	0,335	0,385	0,410	0,585
UIC60	A	2 451	3 091	3 525	3 763	5 637
	α	0,252	0,344	0,392	0,422	0,589
P50	A	2 380	2 950	3 320	3 600	5 170
	α	0,300	0,365	0,410	0,450	0,600

7.2. Основні стани температурної роботи безстикової колії

Під час укладання рейкових плітей їх закріплюють проміжним скріпленням та вимірюють температуру рейки. Цю температуру називають температурою закріплення. Під дією сонячних променів рейкова пліть нагрівається, і в температурно нерухомій частині пліті виникають стискальні поздовжні сили. Зі збільшенням температури рейки сили стискання зростають. Коли значення стискальної сили досягає критичної величини, безстикова колія переходить у непрацездатний стан. Подальша експлуатація в такому стані неможлива, тому що це може призвести до відмови – викиду колії – різкого горизонтального викривлення рейко-шпальної решітки (рис. 17).

Для забезпечення стійкості безстикової колії проти викиду необхідно, щоб поздовжня стискальна сила, яка діє у двох рейкових плітях, не перевищувала критичного значення P_k . Величина цієї сили залежить від конструкції верхньої будови колії, плану колії та її технічних параметрів.

Допустима сила визначається за формулою

$$[P_{t-c}] = P_k / k_c, \quad (175)$$

де k_c – коефіцієнт запасу стійкості, приймається рівним 1,5.



Рис. 17. Непрацездатний стан безстикової колії (викид)

Для визначення критичної поздовжньої температурної сили може бути використана методика проф. С. П. Першина.

Експлуатація безстикової колії здійснюється таким чином, щоб при найвищих температурах рейки поздовжня температурна сила не певищувала допустимого значення $[P_{t-c}]$,

$$P_t \leq [P_{t-c}]. \quad (176)$$

Поздовжня температурна сила визначається за формулою

$$P_t = -2F\alpha E(t_\phi - t_3), \quad (177)$$

де 2 – дві рейки;

F – площа поперечного перерізу рейки;

α – коефіцієнт температурного подовження ($\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$);

E – модуль пружності ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа);

t_{ϕ} – фактична температура рейки;

t_3 – температура закріплення рейкової пліти.

Пліть закріплюють у розрахунковому температурному інтервалі $T_1 \dots T_2$. У випадку коли з тих чи інших причин температура закріплення виходить за межі розрахункового інтервалу, настає непрацездатний стан і виконується розрядка напружень з вирізанням частини пліти та укладанням тимчасової рейки з подальшим остаточним відновленням цілісності пліти зварюванням.

Щоб зберігався працездатний стан у літніх умовах (виконувалася умова (176)), температура закріплення рейкових плітей повинна бути не менше нижньої межі температурного інтервалу закріплення (рис. 18):

$$\left. \begin{array}{l} t_3 < T_1 \quad \text{стан непрацездатний для літніх умов,} \\ t_3 \geq T_1 \quad \text{стан працездатний для літніх умов.} \end{array} \right\} \quad (178)$$

Щоб зберігався працездатний стан у зимовий період температура закріплення рейкових плітей t_3 повинна бути не більше верхньої межі температурного інтервалу закріплення T_2 (див. рис. 18):

$$\left. \begin{array}{l} t_3 < T_2 \quad \text{стан непрацездатний для зимових умов,} \\ t_3 \leq T_2 \quad \text{стан працездатний для зимових умов.} \end{array} \right\} \quad (179)$$

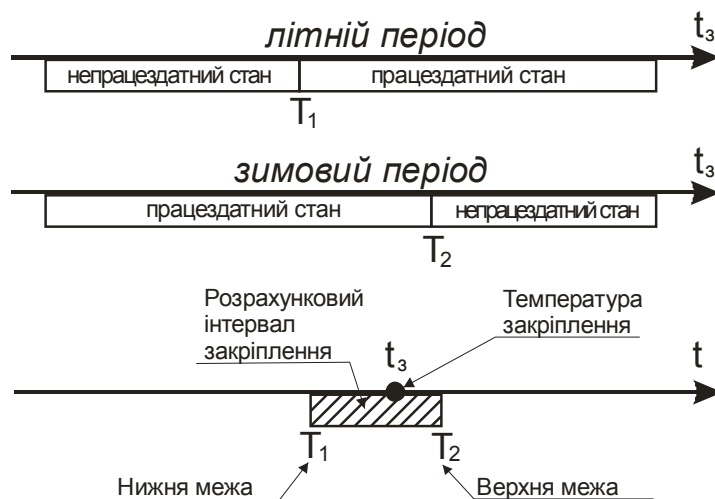


Рис. 18. Стан безстикової колії залежно від температури закріплення

Якщо величина розрахункового інтервалу закріплення більше $10\text{ }^\circ\text{C}$, то безстикову колію можна укласти температурно-напруженого типу, тобто без сезонних розрядок температурних напружень. Неодмінною умовою укладання такої конструкції є закріплення рейкових плітей у межах розрахункового інтервалу.

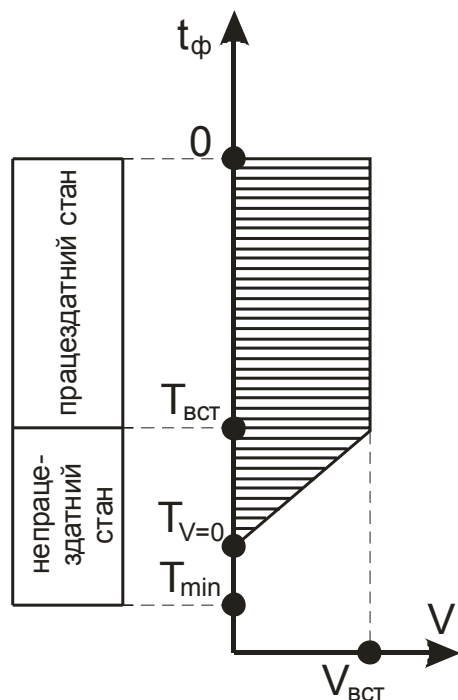


Рис. 19. Стан безстикової колії в зимовий період залежно від фактичної температури

Якщо передбачати закріплення плітей у час, коли температура рейок в процесі закріплення змінюється повільно (восени, у похмуру погоду, у ранкові або вечірні години), мінімально допустимий інтервал закріплення можна зменшити до $5\text{ }^\circ\text{C}$. Якщо температура закріплення не відповідає наведеним умовам, можливі чотири варіанти:

1) вдатися до сезонної розрядки напружень у пліті;

2) вдатися до обмеження швидкості руху поїздів при температурах, близьких до мінімальних T_{\min} (рис. 19);

3) урахування фактичних швидкостей, що реалізуються на конкретних ділянках колії;

4) підвищення потужності верхньої будови колії або використання термічно зміцнених рейок.

Варіанти 2–4 можуть використовуватися тільки в разі порушення температурного режиму роботи пліті в зоні низьких температур (взимку).

Умова міцності рейки для зони низьких температур виконується, якщо не порушується умова

$$t_{\phi} \geq t_3 - \frac{[\sigma] - k_n \sigma_{\text{п-к}}^{(3)}}{\alpha E}, \quad (180)$$

де $[\sigma]$ – максимальне допустиме напруження в підшві рейки;

k_n – коефіцієнт неврахованих факторів (приймається 1,3 для нових рейок);

$\sigma_{п-к}^{(3)}$ – напруження розтягання, що виникають в кромці підошви рейки взимку від рухомого складу, можуть бути визначені за інженерним розрахунком колії на міцність [16].

Враховуючи, що напруження в рейці залежать від швидкості руху, порушення умови (180) може бути усунуте відповідним обмеженням швидкості руху (варіант 2) (див. рис. 19, на якому $T_{вст}$ – мінімальна температура рейки, при якій виконується умова (180) без обмеження встановленої швидкості руху $V_{вст}$; $T_{V=0}$ – температура рейки, при досягненні якої відповідно до умови (180) рух закривається).

Доцільність тимчасового обмеження швидкості руху поїздів встановлюється керівництвом залізниці. У зв'язку з цим, у дистанціях колії для ділянок, на яких може виникнути потреба тимчасового зниження швидкостей, необхідно мати готові таблиці розмірів зниження швидкостей руху поїздів залежно від очікуваної температури. Для цього необхідно виконати спеціальні розрахунки згідно з методикою, представленою в «Технічних вказівках по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України» [17].

Уникнути обмеження швидкості руху поїздів через порушення умови міцності в зимовий період можна, якщо замість плітей, виготовлених із незагартованих рейок, передбачити укладання плітей із термічно зміцнених рейок, для яких допустиме зниження температури збільшується на 20 °С.

7.3. Нейтральна температура

Зміна напруженого стану безстикової колії сьогодні визначається за відстанню між контрольними перерізами рейкової пліті. Ці перерізи відзначають поперечними смугами, нанесеними світлою фарбою зверху підошви рейок усередині колії, і кернами – у створі з бічною гранню підкладки через кожні 100 м над «маячними» шпалами (рис. 20). Як «маячну» вибирають шпалу, розташовану напроти пікетного стовпчика. Її верх біля рейки фарбують яскравою фарбою. Щоб «маячна» шпала не зміщувалася, її завжди добре підбивають, закладні болти на ній надійно затягують, типові клеми замінюють клемами зі зменшеною висотою ніжок, а замість гумових чи гумово-кордових

прокладок вкладають поліетиленові чи інші з низьким коефіцієнтом тертя. При безболтовому пружному скріпленні клеми знімають.

Контроль за позовжніми переміщеннями пліті по «маячних» шпалах може бути доповнений чи замінений перевіркою за поперечними створами, закріпленими постійними реперами.

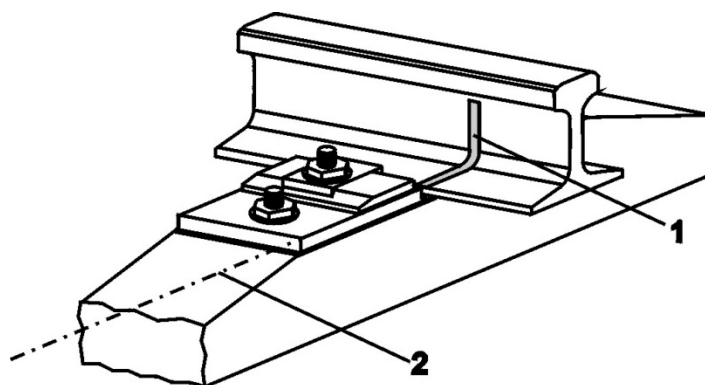


Рис. 20. «Маячна» шпала для контролю уgonу колії:

1 – мітка; 2 – лінія зіставлення мітки з крайкою підкладки

При виявленні по «маячних» шпалах зрушень контрольних перерізів розраховують переміщення (подовження або вкорочення) рейкових плітей між «маячними» шпалами як різницю двох вимірів у сусідніх точках (з їх знаками). Якщо відстань між контрольними перерізами змінилася після останнього закріплення пліті на постійний режим більше ніж на 10 мм, то це свідчить про відчутну нерівномірність напруженого стану плітей по їх довжині. Інакше кажучи, є значні відхилення нейтральної температури від температури закріплення плітей на окремих її ділянках. Нейтральною прийнято називати температуру, при якій у рейкових плітях відсутні позовжні сили.

Для приведення у відповідність нейтральної температури й температури закріплення плітей на ділянках, які мають розходження цих температур, звільнюється від закріплення, виважується на ролики або на ковзкі пари пластин загальною товщиною 8...10 мм.

Якщо зміщення контрольних перерізів на «маячних» шпалах після розкріплення ділянки пліті не перевищує 5 мм, то приймають, що розрахунковий режим відновлений, тобто нейтральна температура відповідає температурі закріплення. Ця ділянка пліті знову закріплюється, хоча насправді внутрішні напруження все одно присутні. Контроль безстикової колії по «маячних» шпалах ведеться в міліметрах,

але ж і сама «маячна» шпала може зрушуватися на декілька міліметрів від впливу коліс рухомого складу.

У випадку коли після останнього перезакріплення пліті поздовжні переміщення контрольних перерізів перевищують 30 мм, необхідно обмежити швидкість руху поїздів залежно від стану та інтенсивності угону, але не більше 60 км/год, і вжити заходів щодо усунення причин появи угону й відновлення температурного режиму пліті.

Якщо зміщення контрольних перерізів перевищують 5 мм, а зміни відстаней між ними перевищують 10 мм, то на коротких плітях виконують розрядку напружень, а на довгих плітях в такому випадку визначається відхилення нейтральної температури від температури закріплення цієї ділянки пліті за формулою

$$\Delta t = \pm 85 \frac{\Delta l}{l}, \quad (181)$$

де Δl – фактично виміряне подовження (+) або вкорочення (–) пліті, мм;

l – відстань між «маячними» шпалами, м.

Остаточне значення нейтральної температури дорівнює

$$T_0 = t_3 \pm \Delta t, \quad (182)$$

де t_3 – температура попереднього закріплення пліті, °С.

Якщо одержана нейтральна температура не виходить за межі розрахункового інтервалу закріплення плітей, то вона заноситься в паспорт-карту і нею керуються при подальшій експлуатації рейкової пліті. У протилежному випадку роблять розрядку напружень.

Недоліками методу контролю по «маячних» шпалах є:

– можливість зрушення «маячної» шпали під час експлуатації колії;

– відсутність надійного способу контролю повноти й рівномірності зняття температурних напружень при їх розрядці;

– відсутність можливості контролю напружень, що залишилися в пліті при примусовому вводі в розрахунковий температурний інтервал;

– вихідна інформація методу – це напружений стан не точки, а ділянки довжиною 100 м.

– неможливість визначення напружень у пліті, накопичених до її вкладання в колію, та неможливість визначення напружень в будь-який час, у будь-якій точці.

Сучасні методи контролю та математичне моделювання дозволяють нейтральну температуру контролювати без вказаних недоліків. Нейтральна температура для ділянки пліті $T_{0д}$ повинна визначатися інтегрально як середнє значення по довжині l цієї ділянки

$$T_{0д} = \frac{\int_l T_{0n}(x) dx}{\int_l dx}. \quad (183)$$

На рис. 21 неведено розподіл нейтральної температури перерізу по довжині ділянки, вимірний магнітним методом.

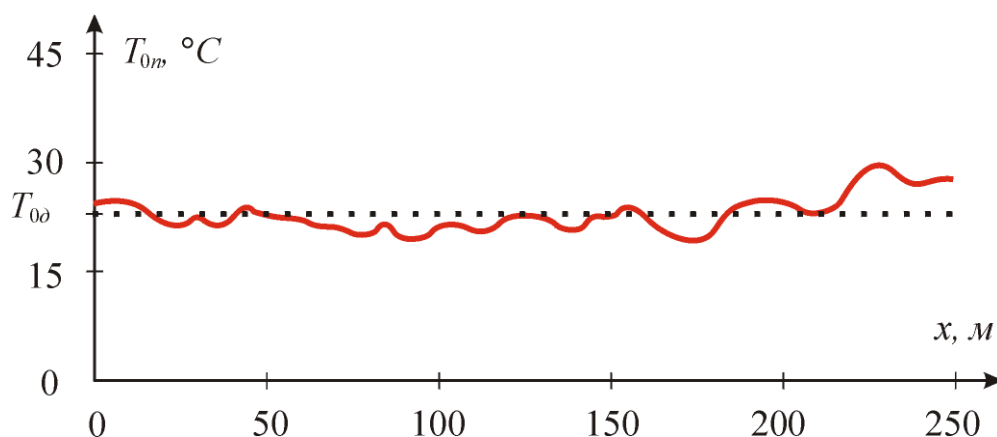


Рис. 21. Розподіл нейтральної температури перерізу рейки по довжині ділянки

Розподілення по довжині нейтральної температури перерізу рейки можна записати у вигляді функції

$$T_{0n}(x) = T_{0д} + a_T \sin\left(\frac{2\pi x}{l_T} + \varphi_T\right), \quad (184)$$

де a_T – амплітуда коливань значення нейтральної температури перетину рейки по довжині (1...5 °C);

l_T – період коливань значення нейтральної температури перерізу рейки по довжині (15...40 м);
 φ_T – зсув фази коливань значення нейтральної температури перерізу рейки по довжині $\left(0 - \frac{\pi}{2} \text{ рад}\right)$.

На момент вкладання пліті в колію по поперечному перерізі присутні внутрішні залишкові напруження, середнє значення яких дорівнює нулю $\bar{\sigma}_v = 0$. Закріплення поперечного перерізу пліті відбувається при певній температурі t_3 . При зміні погодних умов температура перерізу стає рівною \bar{t}_p . У температурно нерухомій частині пліті виникають температурні напруження σ_t . Під час експлуатації колії, при її ремонтах та при угоні (особливий ефект експлуатації) у пліті виникають додаткові напруження $\sigma_{\text{дод}}$. Існує температура перерізу T_{0n} , коли температурні та додаткові напруження взаємно компенсуються, тобто

$$T_{0n} = \bar{t}_p \text{ при } \sigma_t + \sigma_{\text{дод}} = 0. \quad (185)$$

За Технічними вказівками по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України [17] нейтральна температура – це температура, при якій у рейкових плітях відсутні поздовжні сили.

При просторовому моделюванні роботи безстикової колії розподіл фактичної температури по поперечному перерізі рейки можна записати як функцію $t_p = t_p(y, z)$ (рис. 22). Вісь z спрямована назовні колії, сонячне проміння – під кутом до горизонту.

Як видно з рис. 22, фактична температура рейки по її поперечному перерізу при сонячній літній погоді достатньо сильно може змінюватися. З метою забезпечення одноманітності подальших розрахунків у Технічних вказівках по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України [17] регламентовано виконувати вимірювання температури рейки по поверхні головки.

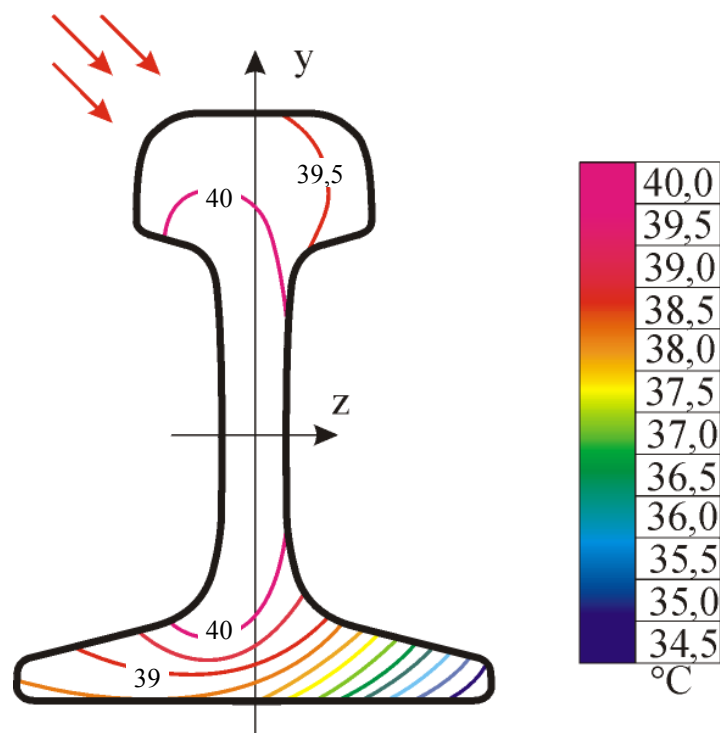


Рис. 22. Модель розподілення фактичної температури рейки

7.4. **Порушення температурного інтервалу закріплення плітей через зниження погонного опору**

Верхня границя інтервалу закріплення визначається через допустиме зниження температури рейки відносно температури закріплення Δt виходячи з умови:

- міцності рейки взимку;
- неперевищення можливого зазору при зломі рейки;
- неперевищення можливого збільшення початкових зазорів між кінцями плітей і зрівнювальних рейок та розриву стикових болтів.

Значення Δt за останніми двома умовами залежить від коефіцієнта пропорційності A , що визначається за формулою

$$A = \frac{\alpha^2 EF}{r}, \quad (186)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення рейкової сталі;

E – модуль пружності рейкової сталі;

F – площа поперечного перерізу рейки;

r – погонний опір поздовжньому переміщенню, нормативне значення для цього розрахунку складає 25 кН/м.

Опір переміщенню відіграє головну роль у роботі безстикової колії. Зі збільшенням пропущеного тоннажу, що проходить по рейкових плітях, зменшується рівень зтяжки клемних болтів та рівень притискання пружних клем, зношуються підрейкові прокладки. Це призводить до зниження погонного опору. Як відомо з практики, по довжині колії клемні болти можуть мати різний рівень зтяжки, стан підрейкових прокладок також різний, а тому й погонний опір поздовжньому переміщенню по довжині колії різний та змінюється в часі. Нормативний погонний опір поздовжньому переміщенню при неуцільненому баласті приймається 7 кН/м, при уцільненому – 12 кН/м для незамерзлого стану (літо) і 25 кН/м для замерзлого стану (зима) [17]. Практично в колії погонний опір може мати інші (у тому числі значно менші) значення.

Знижений погонний опір призведе до того, що величина зазору при зломі пліті перевищить допустиме значення, або стикові болти втратять свою міцність. Якщо в ці формули підставити значення погонного опору менші ніж 25 кН/м, та знайти Δt_p , то виявиться, що Δt_p буде мати менші значення.

Таким чином, зменшення рівня зтяжки клемних болтів та рівня притискання пружних клем знижує значення верхньої межі інтервалу закріплення рейкових плітей безстикової колії, що може призвести до виходу температури закріплення за межі інтервалу закріплення. При такій ситуації настає несправний стан і виникає пряма загроза безпеці руху поїздів у холодний зимовий період.

Конструкція скріплення типу К, яке прикріплює рейку 1, включає: клемний болт 2, клему 3, підкладку 4, підрейкову підкладку 5, а також двовиткові гровери, прикріплювачі підкладки до шпали (рис. 23).

При зтяжці гайки клемного болта моментом M_k в клемному болту виникає зусилля Q . Теоретично при симетричній клемі на рейку передається половина зусилля натяжки болта, тобто $Q/2$. Тоді від двох клем одного комплексу скріплення передається сила величиною Q . Сила опору поздовжньому переміщенню рейки складається із

сили тертя клем по підшві рейки T_1 та сили тертя підшви рейки по підрейковій підкладці T_2 .

Визначимо погонний опір повздовжнього переміщення рейок по опорах при скріпленні КБ з різними підрейковими підкладками і різних значеннях затяжки клемних і затяжки клемних і закладних болтів. Погонний опір переміщенню рейки по опорах

$$r = P_c / l, \quad (187)$$

де P_c – поздовжня сила в момент проковзування рейки по опорах, що припадає на вузол скріплення;

l – відстань між осями шпал.

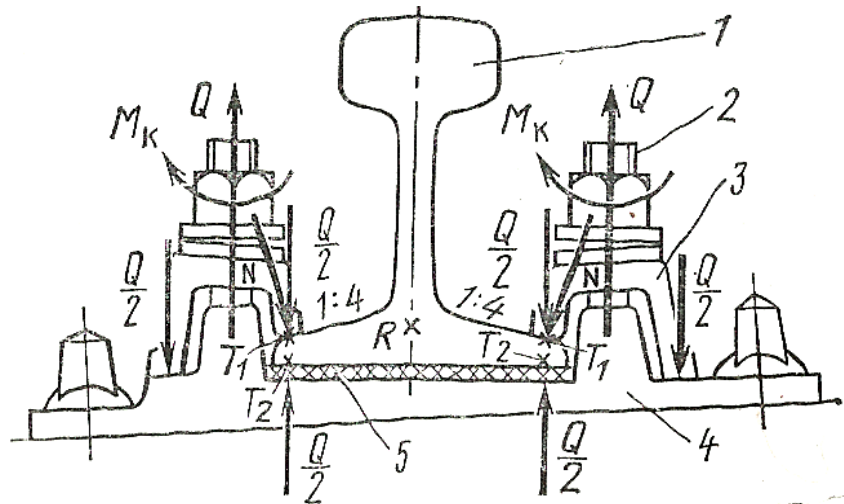


Рис. 23. Розрахункова схема опору проміжного скріплення проковзуванню рейки:

1 – рейка; 2 – болт з гайкою; 3 – клема; 4 – підкладка; 5 – прокладка-мортизатор

За результатами досліджень М. І. Карпуценка (табл. 7.3), найбільший погонний опір поздовжнім переміщенням рейки спостерігається при гумових прокладках, а найменші – при поліетиленових. Опір переміщенню рейки при зношених прокладках зменшується на 20...35 % порівняно з опором нових.

Для підвищення погонних опорів необхідно застосовувати підрейкові прокладки з гуми або з гумокорду, які також добре знижують вертикальну жорсткість вузла скріплення.

Погонний опір r і коефіцієнт тертя f_c у вузлах скріплення КБ

Характеристика прокладок	Матеріал прокладок	r , кН/м, при затяжці клемних болтів моментом, Н·м			f_c
		50	100	150	
Нові	Резина	12,4	19,3	26,2	0,65
	Кордон	12,1	18,0	24,0	0,62
	Поліетелен	7,2	11,3	15,2	0,33
	Фанера	11,6	16,5	21,1	0,52
Зношені	Резина	9,1	15,2	21,3	0,50
	Кордон	9,1	12,1	18,2	0,43
	Поліетелен	6,6	10,4	14,8	0,30
Прокладка відсутня		–	–	–	0,37

На формування погонного опору r значно впливає коефіцієнт тертя підшви рейки по прокладках, який у вузлі скріплення можна визначити за формулою

$$f_c = \frac{rl}{Q_{\text{ом}} \eta \mu}, \quad (188)$$

де f_c – сумарний коефіцієнт тертя, який складається з коефіцієнта тертя f_1 підшви рейки об клеми та коефіцієнти тертя f_2 підшви рейки об підрейкові прокладки, $f_c = f_1 + f_2$;

$Q_{\text{ом}}$ – монтажний натяг клемних болтів;

η – кількість клемних болтів у вузлі скріплення;

μ – коефіцієнт передачі осьового зусилля в болті на підшву рейки.

Сила натягу болтів може бути визначена теоретично або дослідним шляхом через наклеювання тензодатчиків на стержні болтів. При цьому болти затягуються тензометричним ключем з одночасним записуванням зусиль у болті.

Дослідження показують, що крутний момент в гайці болта, рівний 1 Н·м, створює силу натягу болта в середньому $Q_{\text{ом}} = 160$ Н.

Гайки клемних болтів при укладанні рейкових плітей в колію затягуються до нормативного значення 200 Н·м. Під час експлуатації колії рівень затяжки зменшується. Важливим практичним завданням є визначення крутного моменту, з яким затягнуті гайки клемних болтів усієї пліті, та визначення картини розподілу цих значень по довжині.

При оцінці в колії рівня притискання рейки до підкладки вимірювання крутного моменту необхідно проводити для зовнішньої та внутрішньої гайок клемних болтів. Результати з одних таких вимірювань показано на рис. 24.

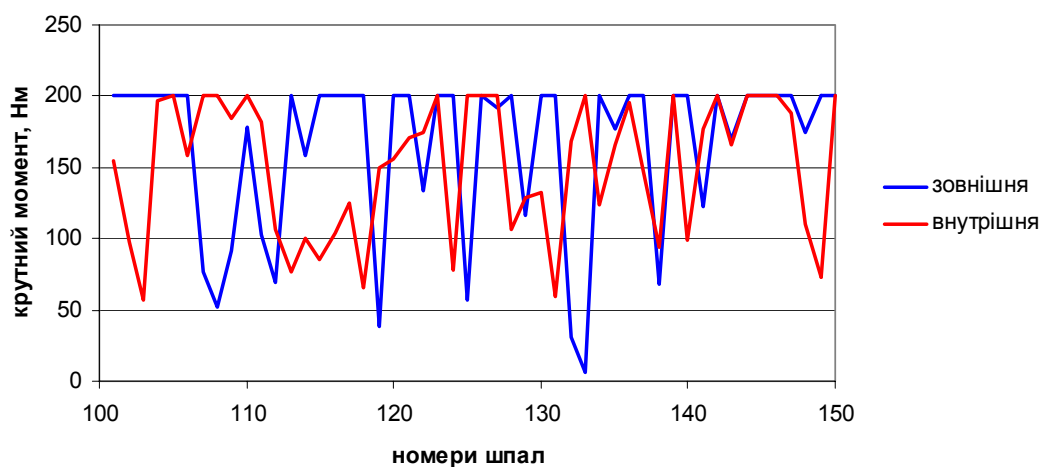


Рис. 24. Рівень затяжки гайок клемних болтів вздовж пліті

З формули (188) виразимо позовжній опір r

$$r = \frac{f_c Q_{\text{бм}} \eta \mu}{l}, \quad (189)$$

Якщо стан підрейкових прокладок задовільний, то згідно з табл. 7.3 $f_c = 0,55$. При епюрі шпал 1 840 шп/км відстань між осями шпал $l = 0,54$ м. Кількість клемних болтів у вузлі скріплення $\eta = 2$.

Підставивши всі відомі значення до (189), та замінивши $Q_{\text{бм}} \eta$ на $(Q_{\text{бм}}^{\text{зовн}} + Q_{\text{бм}}^{\text{внутр}})$, отримаємо картину розподілу погонного опору вздовж колії (рис. 25).

Середнє значення погонного опору за результатами наведених спостережень 21,5 кН/м, середній рівень затяжки гайок клемних болтів складає 158 Н·м.

Визначимо для даного прикладу величину зазору, що утвориться при зломі пліті, за формулою (186):

$$A = 1000 \frac{82,65 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,0000118^2}{21,5} = 0,0112.$$

Це більше за нормативне значення на 17 %.

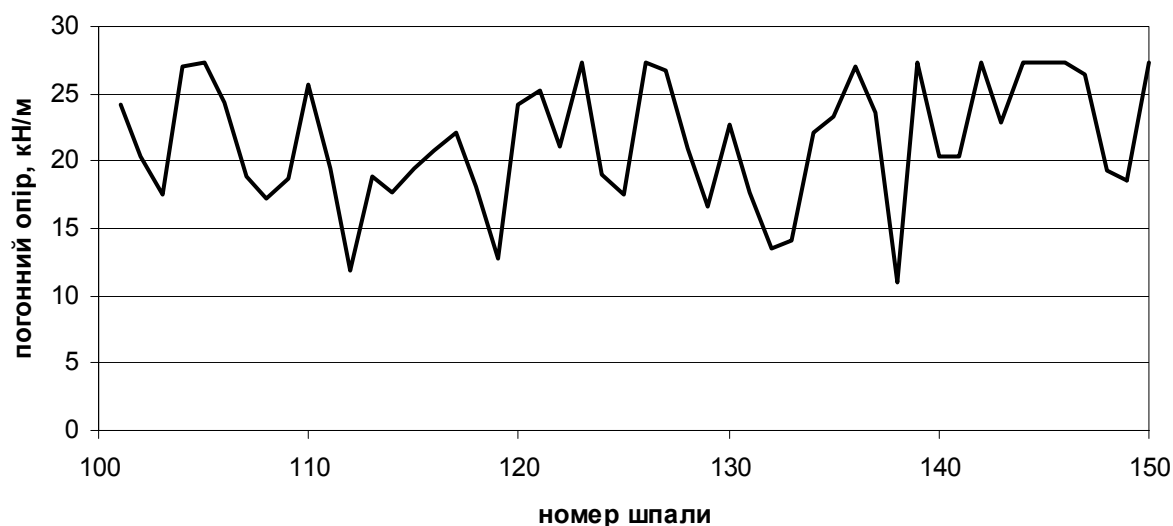


Рис. 25. Розподіл погонного опору вздовж пліті

Виходячи з практичного значення параметра A , для даної ділянки колії допустиме зниження температури рейкових плітей з умови максимального розкриття зазору при зломі пліті становить $67\text{ }^{\circ}\text{C}$, а інструкцією закладено $72\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, зменшення рівня затяжки гайок клемних болтів призводить до зменшення допустимого зниження температури рейкових плітей Δt_{\min} , зниження верхньої границі інтервалу закріплення T_2 , та скорочення інтервалу закріплення $\Delta t_{\text{зак}}$.

Щоб запобігти уgonу плітей, слід забезпечити постійний нормативний натяг клемних, закладних і стикових болтів. Для цього не менше як два рази на рік (як правило, навесні та восени) необхідно підтягувати гайки клемних, закладних і стикових болтів. Підтяжка, як правило, призначається при зниженні середнього значення затяжки гайок клемних болтів до $100\text{ Н}\cdot\text{м}$, закладних – $70\text{ Н}\cdot\text{м}$.

Зусилля затяжки гайок клемних та закладних болтів динамометричними ключами та їх середні значення визначаються за обома рейковими нитками на 10...15 шпалах підряд, розташованих:

- на коротких плітях в трьох зонах – на кінцевих ділянках (на протязі 100 м від кінців плітей) та в середній частині пліті;
- на довгих плітях – на кінцевих ділянках та через кожні 400 м по довжині пліті.

Якщо середнє значення нижче допустимого, то призначається суцільне підтягування клемних та закладних болтів.

Додатковий контроль затяжки гайок клемних і закладних болтів проводиться на ділянках, де спостерігається угон.

При всіх оглядах колії необхідно вибірково простукувати стикові, клемні та закладні болти із записом результатів перевірки в книгу ПУ-28 і у разі потреби підтягувати їх, а за наявності більше 10 % ослаблих гайок з числа перевірених, необхідно в тижневий строк провести перевірку їх затяжки динамометричним ключем.

Таким чином, надійність безстикової колії залежить від контролю нейтральної температури та сили притискання рейки до шпали проміжним скріпленням.

7.5. Технічні засоби контролю напруженого стану безстикової колії

Технічні засоби для контролю параметрів безстикової колії визначають рівень надійності в її роботі, оскільки дають інформацію про стан об'єкта. Розвиток та вдосконалення засобів діагностики сприяє зростанню надійності безстикової колії.

Основний параметр надійності безстикової колії – це напружений стан та нейтральна температура. Контроль за її значенням визначає безпеку робіт і безперебійність руху поїздів, стійкість колії і її міцність.

Одночасно з вкладанням перших дослідних ділянок безстикової колії температурно-напруженого типу виникла необхідність у вимірюванні поздовжніх напружень у рейкових плітях. Актуальність контролю механічних напружень залишилася до сьогодні.

Роботи, пов'язані зі створенням надійних методів контролю напружень, ведуться в багатьох країнах. За принципом дії ці методи можна поділити на дві основні групи: методи, що визначають напруження за зміною геометричних розмірів рейкової пліти, та методи, що визначають напруження за зміною фізичних властивостей матеріалу рейки (рис. 26).



Рис. 26. Класифікація методів контролю напружень у рейкових плітях

До першої групи входять такі підгрупи, як тензометричний, силометричний та оптичний методи вимірювання механічних напружень. До другої – ультразвуковий, електрохімічний та магнітний.

Тензометричний метод контролю напружень. Тензометричні методи базуються на вимірюванні деформацій, що в більшості випадків дає можливість оцінити напружений стан.

Методи тензометрії взагалі поділяються на рентгенівські, поляризаційно-оптичні, муаврових полос, крихких покриттів, гальванічних покриттів та методи тензометрів. Тензометри за фізичним змістом перетворення деформації поділяються на такі типи: механічні, оптичні, пневматичні, струнні, електричні. Електричні тензометри діляться на тензометри ємкості, індуктивності, індукційності, п'єзоелектричні та тензометри опору. Електричні тензометри опору поділяються на такі види: потенціометричні, електролітичні, механотронні, резисторні (тензорезистори).

З усього цього спектру тензометрії в безстиковій колії використовувався лише метод тензометрів, і то частково: електричні тензометри опору (тензорезистори) та механічні тензометри.

Механічний тензометр МТ–200. До механічних засобів належить, наприклад, прилад МТ–200, що був розроблений у ВНИИЖТі (рис. 27) авторами Л. А. Гречишниковим та ін.

Принцип дії МТ–200 – вимірювання зміни базової довжини ($l = 200$ мм), що відбулася за час між даним проміром l_i та проміром l_j у момент останнього закріплення плити (при укладанні, розрядці чи ремонтних роботах і т. д.), або взагалі між будь-якими двома промірами в процесі експлуатації безстикової колії.

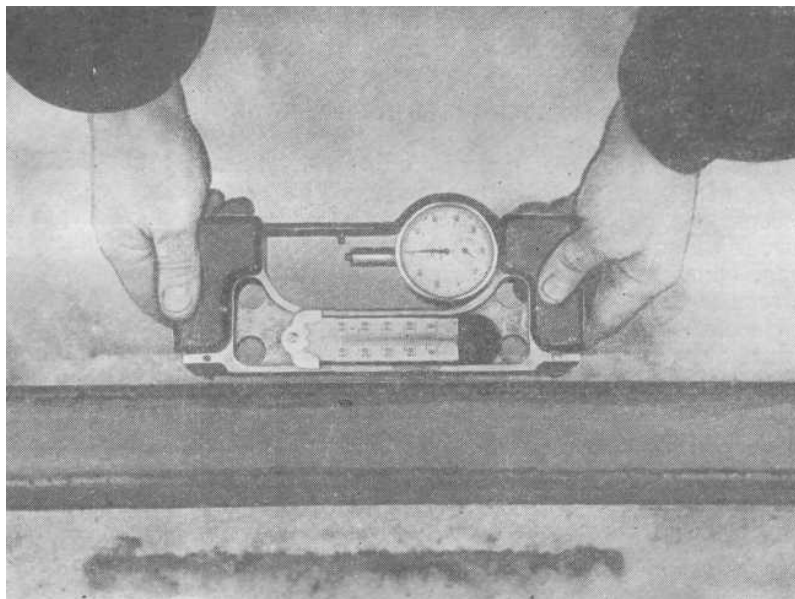


Рис. 27. Зовнішній вигляд деформометра МТ–200

Для закріплення цієї бази на бічних гранях головок рейкових плит по спеціальному шаблону набивають конічні керни діаметром близько 2 мм із кутом у вершині 90° . У ці керни входять кулькові закінчення ніжок приладу.

Одна з ніжок нерухома (відносно корпуса приладу), інша має вісь, навколо якої вона повертається на деякий кут, завдяки чому може входити в другий kern, що зміщується вздовж колії при зміні температури, угоні чи розрядці напружень. Шарнір рухомої ніжки служить також точкою опори важеля зі співвідношенням плечей приблизно

1:5. Завдяки цьому задній кінець важеля зміщується вздовж рейки на відстань у 5 разів більшу, ніж передній кінець важеля разом з керном.

Резисторний тензометр. Дія резисторних тензометрів (тензорезисторів) базується на принципі зміни опору металів та напівпровідників під дією деформацій. Чутливі елементи тензорезисторів можуть бути виконані у вигляді «плоскої котушки» дуже тонкого дроту (діаметром 0,02...0,05 мм) з металу, що має високий питомий електричний опір (ніхром, константан, манганін та ін.), чи у вигляді петлеподібної решітки із тонкої фольги (рис. 28). Чутливий елемент 4 звичайно прикріплюють до основи 2 із ізоляційного матеріалу (водостійкий папір, лакова плівка, тканина та ін.) за допомогою з'єднувальної речовини 3 (клей, цемент), що передають деформацію чутливому елементу. На об'єкті дослідження основу закріплюють також за допомогою з'єднувальної речовини. Для цього використовують особливий клей: бакелітово-фенольний (БФ2, БФ4, БФ6, «Меколь»). Виводи 1 призначені для електричного з'єднання тензорезистора із вимірювальними схемами.

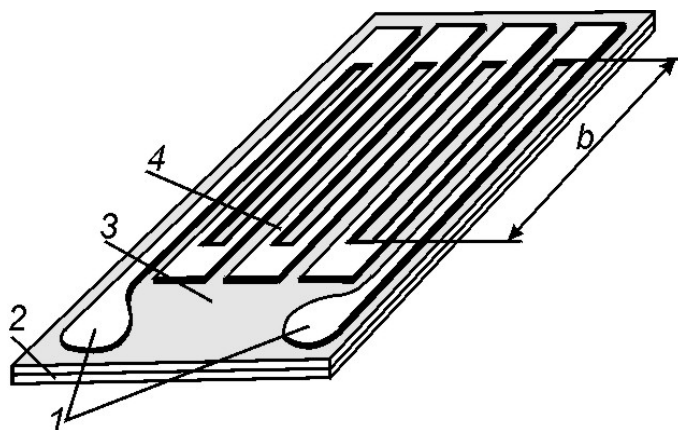


Рис. 28. Тензорезистор:

1 – виводи; 2 – основа; 3 – з'єднувальна речовина;
4 – чутливий елемент; b – база

Принцип роботи тензорезистора – зміна величини струму, що пропускається по чутливому елементу, через зміну електричного опору при його подовженні чи вкороченні разом з деформацією поверхні об'єкта.

На рис. 29 наведено фото приладу, розробленого й виготовленого Уральським ПКБ «Деталь». Прилад призначений для вимірювання температурних напружень у плітях безстикової колії, а також

температури рейок та стикових зазорів. На пліті в потрібних місцях встановлюються блоки датчиків, що містять тензорезистори та формувачі номеру даного блока. Переносним приладом періодично вимірюють розбалансування опору тензорезисторів та заносять в пам'ять прилада. Прилад може зберігати в пам'яті та автоматично обробляти декілька тисяч відліків. Передбачена можливість передачі інформації в комп'ютер для ведення бази даних про стан ділянки колії, що обслуговується, та повторної обробки інформації.



Рис. 29. Тензорезисторний прилад для вимірювання температурних напружень у рейкових плітях безстикової колії

Метод Іванова–Смурова. У 1983 р. співробітники ДПТУ (зараз Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна) О. Г. Іванов і М. І. Смуров запропонували безконтактний оптичний спосіб вимірювання уgonу колії, суть якого – використання візирного променя труби геодезичного інструмента, що відпрацював свій строк служби. Трубу кріплять поперек осі колії на опорі контактної мережі чи іншому нерухомому пристрої. На рейках роблять мітки, і по них перевіряють поздовжні зсуви пліті. З'явилася можливість фіксувати деформації рейок під поїздами. Пізніше в комплект апаратури додали фоторезистори, і вимірювання стало автоматичним.

Метод лазерних міток. Метод лазерних міток дозволяє визначати напружений стан рейкової пліті регулярними вимірюваннями. Метод базується на визначенні відносно з великою точністю відстаней між

мітками, які лазерними сигналами в певній кількості підряд наносяться на неробочу грань голівки рейкової пліти. Сигнали, записані під час виготовлення рейки, можуть бути виміряні спеціальним обладнанням на певній ділянці після того, як рейкова пліть вкладається в колію.

Метод поперечних створів. Метод поперечних створів базується на вимірюванні поздовжніх переміщень окремих перерізів рейкової пліти, за якими виконується оцінка її напруженого стану. Для цього здійснюється розбивка поперечних створів, що закріплюються реперами. Репери можуть розташовуватися на опорах контактної мережі, штучних спорудах, будівлях, спеціально вкопаних у ґрунт стовпчиках та інших нерухомих спорудах біля колії. При промірах між реперами натягується тонкий шнур (шовковий або капроновий). На зовнішніх гранях голівок рейкових плітей набиваються керни, від яких робляться відліки до поперечного створу металічною лінійкою з точністю до 1 мм.

Ультразвуковий метод контролю напружень. Принцип ультразвукових методів контролю – зміна швидкості проходження звуку через матеріал при зменшенні чи збільшенні механічного навантаження (напруження): чим більше напруження, тим вище швидкість проходження звуку між двома контрольними точками. У Польщі у Вроцлавському політехнічному інституті у 80–90-ті роки сконструювали прилад UMN–10, що базується на використанні ультразвукових хвиль.

Метод магнітної проникності. За наявності у феромагнетику напружень розтягання магнітна проникність у головному напрямку дії цих напружень збільшується. Це явище називається магнітопружним ефектом, або явищем магнітної пружності. Магнітну пружність називають також зворотним магніострикційним ефектом на відміну від прямого магніострикційного ефекту. Останній полягає в появі деформацій або напружень у матеріалі при зміні величини напруженості магнітного поля, що впливає на нього. Магнітна пружність властива в тій чи іншій мірі більшості феромагнітних матеріалів, а також більш важливо, – рейковій сталі.

В основі цього методу лежить різна магнітна проникність матеріалів залежно від ступеня стискання чи розтягання. Робота зводиться до створення в рейці магнітного поля й порівняння намагніченості окремих місць з ненавантаженою ділянкою (еталоном). Можна

вимірювати напруження і без еталона (диференційний метод): у рейковій пліті магнітне поле наводять двома соленоїдами, а активні датчики розташовують хрестоподібно під кутом до активних соленоїдів. Магнітні силові лінії утворять рівноплечий симетричний «швейцарський хрест». За наявності механічного навантаження (присутні в рейці поздовжні сили) симетрія порушується, і активні датчики показують різницю ЕРС (електрорушійної сили), що пропорційна зміні навантаження.

Метод визначення механічних напружень статичного характеру в рейці по такому параметру, як магнітна проникність виконується таким чином. Беруть зразок 1 (рис. 30) такої ж рейки, як і рейка колії. Цей зразок закріплюють у захваті навантажувального пристрою, а на поверхню голівки 2 рейки встановлюють магнітопружний датчик 3, який являє собою ортогонально розміщені намагнічувальний 5 та вимірювальний 6 магнітопроводи з намагнічувальною 7 та вимірювальною 8 обмотками на них.

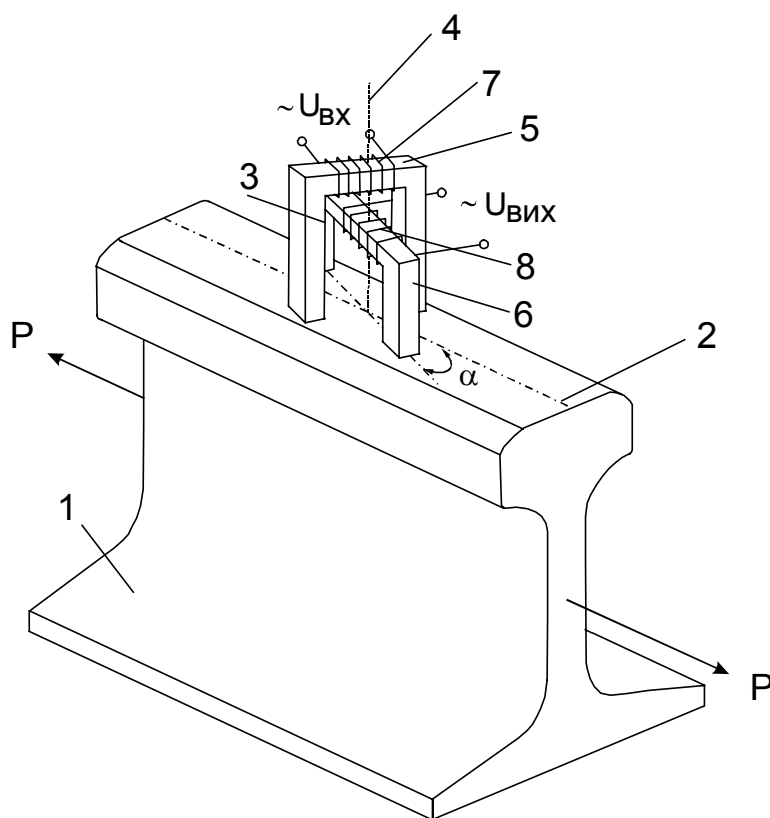


Рис. 30. Схема вимірювання напружень методом магнітної проникності

Зразок 1 навантажують відомим напруженням. Магнітопружний датчик 3 розміщують посередині поверхні головки 2 рейки під кутом α , який вимірюється між поздовжньою віссю рейки та вертикальною площиною вимірювального магнітопроводу 6. На намагнічувальну обмотку 7 подають синусоїдну змінну напругу від зовнішнього генератора, а на вимірювальній обмотці 8 вимірюють амплітуду вихідного сигналу. Фіксують значення вихідного сигналу при $\alpha = 0^\circ$.

Повертають магнітопружний датчик 3 навколо його осі 4 на кут $\alpha = 45^\circ$ і знову фіксують значення вихідного сигналу. Розраховують коефіцієнт пропорційності між прикладеним напруженням та різницею вихідних сигналів. Потім безпосередньо на рейці в колії посередині поверхні головки 2 розміщують магнітопружний датчик 3 в тому перерізі рейки, де визначають механічні напруження. На намагнічувальну обмотку 7 подають синусоїдну змінну напругу від зовнішнього генератора, а на вимірювальній обмотці 8 вимірюють амплітуду вихідного сигналу. Фіксують значення вихідного сигналу при $\alpha = 0^\circ$, повертають магнітопружний датчик 3 навколо його осі 4 на кут $\alpha = 45^\circ$ і знову фіксують значення вихідного сигналу. За отриманим значенням підраховують механічні напруження за формулою

$$\sigma = k(U_{0^\circ} - U_{45^\circ}), \quad (190)$$

де k – коефіцієнт пропорційності між напруженням у рейці та різницею вихідних сигналів;

U_{0° – значення амплітуди вихідного сигналу при куті між поздовжньою віссю рейки та вертикальною площиною вимірювального магнітопроводу, рівному 0° ;

U_{45° – значення амплітуди вихідного сигналу при куті між поздовжньою віссю рейки та вертикальною площиною вимірювального магнітопроводу, рівному 45° .

Отже, метод магнітної проникності базується на тому, що магнітна властивість матеріалу залізничної рейки залежить від її напруженого стану. Але ця залежність змінюється, з одного боку, зі зміною напруженого стану, а з іншого – зі зміною структури матеріалу рейки.

Метод магнітного шуму. До магнітного методу належить і метод магнітного шуму (ефект Баркгаузена), на основі якого в Угорщині в 2004 р. було побудовано прилад RailScan (рис. 31).

Метод магнітного шуму полягає в тому, що намагнічування й розмагнічування металу рейки відбувається по гістерезисному циклі не рівномірно, а стрибками. Феромагнітні матеріали за відсутності магнітного поля складаються з областей довільного намагнічування (доменів), кожна з яких намагнічена практично до насичення.



Рис. 31. Прилад для вимірювання напружень методом магнітного шуму

Вектори намагніченості цих областей спрямовані уздовж, так званих, напрямків легкого намагнічування. При намагнічуванні і перемагнічуванні відбувається повертання доменів феромагнетика до співпадання з напрямком вектора напруженості зовнішнього магнітного поля. Через неоднорідність матеріалу границі доменів можуть змінюватися, тільки якщо буде подолано деякий енергетичний бар'єр. При цьому виникає характерний електромагнітний шум Баркгаузена.

Розроблений прилад вимірювання напружень допускає, що якість матеріалу рейки однорідна. Метод дозволяє усунути вплив заводських залишкових напружень, виконуючи вимірювання при двох різних напружених станах. Тому для цього на вибраних для вимірювання ділянках рейок необхідно виконувати цикл калібрувальних вимірювань.

Метод коерцитивної сили. Як основний магнітний параметр для контролю може бути обрана величина коерцитивної сили, тому що вона завжди залежить від напруження. МНПО «СПЕКТР» і фірма СНР розробили магнітний коерцитиметр КРМ–ЦК із перетворювачем на постійному магніті. На магнітному принципі базуються прилади, створені за останні десятиріччя в Росії та інших країнах: ПИОН – визначник залишкових напружень (автор Н.Н. Максимов, 1970 р.), ИСОН – вимірник статичних залишкових напружень (Н.Ф. Врублевський, 1991 р.), прилад, розроблений у Польщі Е. Якубовичем та ін. (1982 р.), прилад свердловського «ПромстройНИИПроекта» (Т.Х. Бекташев, 1983 р.), прилад Японських Національних залізниць (1989 р.), прилад AREA (США, 1982 р.).

Таким чином, за останні декілька десятиріч широкого розвитку набуває магнітний метод вимірювання напружень. Хоча перераховані в цьому підрозділі та аналогічні їм прилади великого поширення на залізницях не отримали, відносна простота та невимогливість дозволяють розробляти нові більш досконалі прилади та методи управління надійністю безстикової колії.

Контрольні запитання та завдання

1. Які існують методи розрахунку величин поздовжніх критичних сил в рейкових плітях?
2. Назвіть причини викиду безстикової колії?
3. Від яких параметрів залежить критична сила?
4. Що відбувається при викиді безстикової колії?
5. Що таке нейтральна температура?
6. Яка різниця між температурою закріплення та нейтральною температурою?
7. Які фізичні основи в методі «маячних» шпал?
8. Які причини порушення розрахункового інтервалу закріплення плітей?
9. До якого значення крутного моменту повинні бути затягнуті гайки клемних болтів?
10. Які існують технічні засоби контролю роботи безстикової колії?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення [Текст]. Затверджено наказом Держстандарту України № 333 від 28.12.1994 р. – К. : Держстандарт України, 1995. – 91 с.
2. ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення [Текст]. Затверджено наказом Держстандарту України № 310 від 08.12.1994 р. – К. : Держстандарт України, 1995. – 33 с.
3. ДСТУ 2862-94 Надежность техники. Методы расчетов показателей надежности. Общие требования [Текст]. Затверджено наказом Держстандарту України № 310 від 08.12.1994 р. – К. : Держстандарт України, 1995. – 39 с.
4. ДСТУ 2864-94 Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення [Текст]. Затверджено наказом Держстандарту України № 310 від 08.12.1994 р. – К. : Держстандарт України, 1995. – 32 с.
5. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними [Текст]. Затверджено наказом Держстандарту України № 31 від 22.01.1995 р. – К. : Держстандарт України, 1995. – 124 с.
6. Проников, А. С. Надежность машин [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 591 с.
7. Тарнопольский, Г. И. О влиянии осевых нагрузок подвижного состава на срок службы рельсов [Текст] / Г. И. Тарнопольский, В. Н. Шкляр // Тр. НИИЖТа. – 1975. – Вып. 163. – С. 3–7.
8. Гресько, В. С. Анализ дефектов железобетонных шпал [Текст] / В. С. Гресько // Тр. ДИИТа. – 1974. – Вып. 148. – С. 128–135.
9. Карпущенко, Н. И. Надежность связей рельсов с основанием [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. И. Карпущенко. – М. : Транспорт, 1986. – 150 с.
10. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 2005. – 479 с.
11. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности [Текст] : учеб. пособие для вузов / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
12. Шор, Я. Б. Статистические методы анализа и контроля надежности [Текст] : учеб. пособие для вузов / Я. Б. Шор. – М. : Сов. радио, 1962. – 552 с.

13. Карпущенко, Н. И. Надежность железнодорожного пути [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. И. Карпущенко, Г. И. Тарнопольский. – Новосибирск : НИИЖТ, 1989. – 104 с.
14. Карпущенко, Н. И. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. И. Карпущенко, Д. В. Величко. – Новосибирск : СГУПС, 2008. – 321 с.
15. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України ЦП-0060 [Текст]. Затверджено наказом Укрзалізниці № 18-ЦЗ від 05.07.2000 р. – Д. : Арт-Пресс, 2000. – 148 с.
16. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
17. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України. ЦП-0266 [Текст]: Затв.: Наказ Укрзалізниці № 033-Ц від 01.02.2012 р. / Мін-во інфраструктури України. – Київ, 2012. – 147 с.

ДОДАТОК

Таблиця Д.1

Таблиця значень $t_{\varepsilon} = t(\alpha, n)$

n	α			n	α		
	0,95	0,99	0,999		0,95	0,99	0,999
5	2,78	4,60	8,61	20	2,093	2,861	3,883
6	2,57	4,03	6,86	25	2,064	2,797	3,745
7	2,45	3,71	5,96	30	2,045	2,756	3,659
8	2,37	3,50	5,41	35	2,032	2,720	3,600
9	2,31	3,36	5,04	40	2,023	2,708	3,558
10	2,26	3,25	4,78	45	2,016	2,692	3,527
11	2,23	3,17	4,59	50	2,009	2,679	3,502
12	2,20	3,11	4,44	60	2,001	2,662	3,464
13	2,18	3,06	4,32	70	1,996	2,649	3,439
14	2,16	3,01	4,22	80	1,991	2,640	3,418
15	2,15	2,98	4,14	90	1,987	2,633	3,403
16	2,13	2,95	4,07	100	1,984	2,627	3,392
17	2,12	2,92	4,02	120	1,980	2,617	3,374
18	2,11	2,90	3,97	∞	1,960	2,576	3,291
19	2,10	2,88	3,92				

Таблиця Д.2

$$\text{Значення функції } \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

x	Розряд	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	3989	3989	3988	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	0,	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	0,	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	0,	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3725	3712	3697
0,4	0,	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	0,	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	0,	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	0,	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	0,	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	0,	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,	2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	0,	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	0,	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	0,	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	0,	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	0,	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	0,	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0,0	9405	9246	9089	8933	8780	8628	8478	8329	8183	8038
1,8	0,0	7895	7754	7614	7477	7341	7206	7074	6943	6814	6687
1,9	0,0	6562	6438	6316	6195	6077	5959	5844	5730	5618	5508
2,0	0,0	5399	5292	5186	5082	4980	4879	4780	4682	4586	4491
2,1	0,0	4398	4307	4217	4128	4041	3955	3871	3788	3706	3626
2,2	0,0	3547	3470	3394	3319	3246	3174	3103	3034	2965	2898
2,3	0,0	2833	2768	2705	2643	2582	2522	2463	2406	2349	2294
2,4	0,0	2239	2186	2134	2083	2033	1984	1936	1888	1842	1797

Закінчення табл. Д.2

x	Розряд	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,5	0,0	1753	1709	1667	1625	1585	1545	1506	1468	1431	1394
2,6	0,0	1358	1324	1289	1256	1223	1191	1160	1130	1100	1071
2,7	0,0	1042	1014	0987	0961	0935	0909	0885	0861	0837	0814
2,8	0,00	7915	7696	7483	7274	7071	6873	6679	6491	6307	6127
2,9	0,00	5952	5782	5616	5454	5296	5143	4993	4847	4705	4567
3,0	0,00	4432	4301	4173	4049	3928	3810	3695	3584	3475	3370
3,	0,00	4432	3267	2384	1723	1232	0873	0612	0425	0292	0199
4,	0,000	1338	0893	0589	0385	0249	0160	0101	0064	0040	0024
5,	0,00000	1487	0897	0536	0317	0186	0108	0062	0035	0020	0011

Наприклад:

1. $x = 0,86$ за стовпцями 1 і 9 рядка 0,8 маємо $\varphi(0,86) = 0,2756$;
2. $x = 4,2$ за стовпцями 1 і 5 рядка 4, маємо $\varphi(4,2) = 0,0000589$.

Таблиця Д.3

$$\text{Значення функції } F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

x	Розряд	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,3	0,	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480	6517
0,4	0,	6551	6594	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,5	0,	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190	7224
0,6	0,	7257	7291	7321	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,7	0,	7580	7611	7642	7673	7704	7734	7764	7794	7823	7852
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
0,9	0,	8159	8186	8222	8238	8264	8289	8315	8340	8365	8389
1,0	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,1	0,	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8780	8790	8810	8830
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,3	0,9	0320	0490	0658	0824	0988	1149	1308	1466	1621	1774
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189

Продовження табл. Д.3

x	Розряд	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,5	0,9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295	4408
1,6	0,9	4520	4630	4738	4855	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,7	0,9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246	6327
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
1,9	0,9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7588	7615	7670
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8169
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,3	0,9	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134	9158
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,5	0,99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060	5201
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6310	6427
2,7	0,99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282	7365
2,8	0,99	7445	7523	7509	7673	7774	7814	7882	7948	8012	8074
2,9	0,99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559	8605
3,0	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0,999	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886

Продовження табл. Д.3

x	Розряд	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,2	0,999	3129	3363	3590	3810	4022	4230	4429	4623	4810	4991
3,3	0,999	5166	5335	5499	5658	5811	5959	6103	6242	6376	6505
3,4	0,999	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7493	7585
3,5	0,999	7674	7760	7842	7922	7999	8074	8146	8215	8282	8347
3,6	0,999	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,7	0,999	8922	8964	9004	9043	9080	9116	9150	1849	9216	9247
3,8	0,9999	2765	3052	3327	3593	348	4094	4331	4558	4777	4988
3,9	0,9999	5190	5385	5573	5753	5926	6092	6252	6406	6554	6696
4,0	0,9999	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843
4,1	0,9999	7934	8022	8106	8186	8264	8338	8409	8477	8542	8606
4,2	0,9999	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9023	9066	9107
4,3	0,99999	1460	1837	2198	2544	2876	3193	3497	3788	4066	4332
4,4	0,99999	4588	4832	5065	5288	5502	5706	5902	6089	6268	6439
4,5	0,99999	6602	6759	6908	7051	8187	7318	7442	7561	7675	7784
4,6	0,99999	7888	7987	8081	8172	8258	8340	8419	8494	8566	8634
4,7	0,99999	8699	8761	8821	8877	8931	8983	9032	9079	9124	9166
4,8	0,999999	2067	2454	2882	3173	3508	3827	4131	4420	4696	4958

Закінчення табл. Д.3

x	Розряд	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4,9	0,9999999	5208	5446	5673	5888	6094	6289	6475	6652	6821	6981
5,0	0,9999999	7134	7278	7416	7548	7672	7791	7904	8011	8113	8210
5,1	0,9999999	8302	8389	8472	8551	8626	8698	8765	8830	8891	8949
5,2	0,9999999	004	056	105	152	197	240	280	318	354	388
5,3	0,9999999	421	452	481	509	539	560	584	606	628	648
5,4	0,9999999	667	685	702	718	734	748	762	775	787	799
5,5	0,9999999	810	821	831	840	849	857	865	873	880	886
5,6	0,9999999	893	899	906	910	915	920	924	929	933	936
5,7	0,9999999	40	44	47	50	53	55	58	60	63	65
5,8	0,9999999	67	69	71	72	74	75	77	78	79	81
5,9	0,9999999	82	83	84	85	86	87	87	88	89	90
6,0	0,9999999	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Правила використання, як у табл. Д.2.

Значення гамма-функції $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,0000	1,25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1,01	0,9943	1,26	0,9044	1,51	0,8866	1,76	0,9214
1,02	0,9888	1,27	0,9025	1,52	0,8870	1,77	0,9238
1,03	0,9835	1,28	0,9007	1,53	0,8876	1,78	0,9262
1,04	0,9784	1,29	0,8990	1,54	0,8882	1,79	0,9288
1,05	0,9735	1,30	0,8975	1,55	0,8889	1,80	0,9314
1,06	0,9687	1,31	0,8960	1,56	0,8896	1,81	0,9341
1,07	0,9642	1,32	0,8946	1,57	0,8905	1,82	0,9368
1,08	0,9597	1,33	0,8934	1,58	0,8914	1,83	0,9397
1,09	0,9555	1,34	0,8922	1,59	0,8924	1,84	0,9426
1,10	0,9514	1,35	0,8912	1,60	0,8835	1,85	0,9456
1,11	0,9474	1,36	0,8902	1,61	0,8947	1,86	0,9487
1,12	0,9436	1,37	0,8893	1,62	0,8959	1,87	0,9518
1,13	0,9399	1,38	0,8885	1,63	0,8972	1,88	0,9551
1,14	0,9364	1,39	0,8879	1,64	0,8986	1,89	0,9584
1,15	0,9330	1,40	0,8873	1,65	0,9001	1,90	0,9618
1,16	0,9228	1,41	0,8868	1,66	0,9017	1,91	0,9652
1,17	0,9267	1,42	0,8864	1,67	0,9033	1,92	0,9688
1,18	0,9237	1,43	0,8860	1,68	0,9050	1,93	0,9724
1,19	0,9209	1,44	0,8858	1,69	0,9068	1,94	0,9761
1,20	0,9182	1,45	0,8857	1,70	0,9086	1,95	0,9799
1,21	0,9156	1,46	0,8856	1,71	0,9106	1,96	0,9837
1,22	0,9131	1,47	0,8856	1,72	0,9126	1,97	0,9877
1,23	0,9108	1,48	0,8857	1,73	0,9147	1,98	0,9917
1,24	0,9085	1,49	0,8859	1,74	0,9168	1,99	0,9958

Закінчення табл. Д.4

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
0,5	1,7725	2,5	1,3294	4,5	11,632	6,5	287,88
1	1	3	2	5	24	7	720
1,5	0,8862	3,5	3,3233	5,5	52,342	7,5	1 871,2
2	1	4	6	6	120	8	5040

Гамма-функція для будь-якого значення x визначається за формулою $\Gamma(x) = (x-1)\Gamma(x-1)$ та за допомогою таблиці.

Таблиця Д.5

Квантилі нормального розподілу U_p

P_i	U_p	P_i	U_p	P_i	U_p	P_i	U_p
0,50	0,000	0,66	0,412	0,82	0,915	0,975	1,960
0,51	0,025	0,67	0,440	0,83	0,954	0,980	2,054
0,52	0,050	0,68	0,468	0,84	0,994	0,985	2,170
0,53	0,075	0,69	0,496	0,85	1,036	0,990	2,326
0,54	0,100	0,7	0,524	0,86	1,080	0,991	2,366
0,55	0,126	0,71	0,553	0,87	1,126	0,992	2,409
0,56	0,151	0,72	0,583	0,88	1,175	0,993	2,457
0,57	0,176	0,73	0,613	0,89	1,227	0,994	2,512
0,58	0,202	0,74	0,643	0,90	1,282	0,995	2,570
0,59	0,228	0,75	0,674	0,91	1,341	0,996	2,652
0,60	0,253	0,76	0,706	0,92	1,405	0,997	2,748
0,61	0,279	0,77	0,739	0,93	1,476	0,9975	2,807
0,62	0,305	0,78	0,772	0,94	1,555	0,9980	2,878
0,63	0,332	0,79	0,806	0,95	1,645	0,9990	3,090
0,64	0,358	0,80	0,842	0,96	1,751	0,9995	3,291
0,65	0,385	0,81	0,878	0,97	1,881	0,9999	3,719

У таблиці наведені дані для ймовірності $0,5 \leq P \leq 1$. Якщо $P < 0,5$, то визначають $(1-P)$, тобто $U_{1-p} = -U_p$. Наприклад, $P = 0,15$; $1-P = 1-0,15 = 0,85$; $U_{0,15} = -U_{0,85} = -1,080$.

Таблиця Д.6

Допоміжні функції

k	$f_1(k)$	$f_2(k)$	$f_3(k)$	k	$f_1(k)$	$f_2(k)$	$f_3(k)$
-2,0	2,373	1,003	0,516	0	0,7979	1,517	1,241
-1,9	2,285	1,004	0,524	0,1	0,7353	1,667	1,370
-1,8	2,197	1,005	0,530	0,2	0,6754	1,863	1,523
-1,7	2,110	1,006	0,537	0,3	0,6172	2,119	1,704
-1,6	2,024	1,009	0,546	0,4	0,5619	2,453	1,919
-1,5	1,939	1,011	0,556	0,5	0,5092	2,893	2,178
-1,4	1,854	1,015	0,568	0,6	0,4592	3,473	2,488
-1,3	1,770	1,019	0,583	0,7	0,4119	4,241	2,863
-1,2	1,688	1,025	0,600	0,8	0,3676	5,261	3,319
-1,1	1,606	1,032	0,620	0,9	0,3261	6,623	3,876
-1,0	1,525	1,042	0,643	1	0,2876	8,448	4,561
-0,9	1,446	1,054	0,671	1,1	0,2520	10,90	5,408
-0,8	1,367	1,069	0,702	1,2	0,2194	14,22	6,462
-0,7	1,290	1,089	0,740	1,3	0,1897	18,73	7,780
-0,6	1,215	1,114	0,783	1,4	0,1629	24,89	9,442
-0,5	1,141	1,147	0,833	1,5	0,1388	33,34	11,55
-0,4	1,069	1,189	0,891	1,6	0,1174	44,99	14,24
-0,3	0,9982	1,243	0,959	1,7	0,0984	61,13	17,71
-0,2	0,9294	1,312	1,039	1,8	0,0819	83,64	22,19
-0,1	0,8626	1,401	1,132	1,9	0,0676	115,2	28,05

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	4
1.1. Основні поняття й терміни теорії надійності	4
1.2. Показники надійності.....	11
1.2.1. Основні характеристики показників надійності залізничної колії.....	11
1.2.2. Показники безвідмовності	14
1.2.2.1. Показники безвідмовності для невідновлюваних об'єктів	15
1.2.2.2. Показники безвідмовності для відновлюваних об'єктів	19
1.2.3. Показники збережуваності	22
1.2.4. Показники довговічності	22
1.2.5. Показники ремонтпридатності.....	24
1.2.6. Комплексні показники	28
МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ.....	32
2.1. Основні поняття й терміни математичного моделювання.....	32
2.2. Однофакторний дисперсійний аналіз.....	35
2.3. Двофакторний дисперсійний аналіз	45
2.4. Апроксимація результатів спостережень математичними функціями	48
МОДЕЛІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ У ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	58
3.1. Система збору та обробки інформації щодо надійності.....	58
3.2. Теоретичні закони розподілу напрацювання до відмови.....	62
3.2.1. Експонентний розподіл.....	63
3.2.2. Нормальний розподіл (закон Гаусса)	66
3.2.3. Розподіл Релея.....	68
3.2.4. Розподіл Вейбулла.....	69
3.2.5. Метод квантилів.....	70
3.3. Перевірка відповідності дослідного розподілу теоретичному	72
МОДЕЛІ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ, ЩО РЕМОНТУЮТЬСЯ.....	75
4.1. Загальні підходи	75
4.2. Показники надійності для об'єктів, що ремонтуються, але не відновлюються в процесі використання.....	76

4.3. Показники надійності для об'єктів, що ремонтуються та відновлюються в процесі використання.....	80
4.4. Класифікація резервованих технічних систем	84
4.5. Параметрична надійність залізничної колії.....	90
4.6. Життєвий цикл надійності залізничної колії.....	98
ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ РЕЙОК	103
5.1. Аналіз відмов рейок з погляду надійності.....	103
5.2. Витривалість та ресурс рейок	105
5.2.1. Раптові відмови.....	105
5.2.2. Поступові відмови рейок	108
5.3. Імовірнісна моделі параметрів надійності рейок.....	111
ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДРЕЙКОВОЇ ОСНОВИ	112
ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ РОБОТИ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ.....	114
7.1. Моделювання стійкості безстикової колії	114
7.2. Основні стани температурної роботи безстикової колії.....	119
7.3. Нейтральна температура.....	123
7.4. Порушення температурного інтервалу закріплення плітей через зниження погонного опору	128
7.5. Технічні засоби контролю напруженого стану безстикової колії.....	134
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	144
ДОДАТОК.....	146

Для нотаток

Для нотаток

Навчальне видання

Бондаренко Ірина Олександрівна
Курган Дмитро Миколайович
Арбузов Максим Анатолійович

Надійність залізничної колії

Навчальний посібник

Редактор *О. О. Котова*
Комп'ютерна верстка *О. М. Гончаренко*

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 8,95. Обл.-вид. арк. 9,12.
Тираж 300 пр. Зам. №

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Друкарня ТОВ «Акцент ПП»
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4766 від 04.09.2014 р.