

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РЕЙОК В КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ В УМОВАХ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Проводилися дослідження роботи рейок, які експлуатуються в умовах метрополітену, що суттєво відрізняється від їх роботи у магістральній колії. Тому вимоги до їх надійності повинні відповідати умовам безпеки руху поїздів. Існуюча нормативна база по суцільній заміні рейок для метрополітенів застосовувалася як і для магістральної колії, не враховуючи диференційовано кривизни залізничної колії.

На підставі використання теорії надійності та ймовірностей запропонована математична модель для поступових відмов рейок в реальних умовах метрополітену, яка враховує пропущений тоннаж, кривизну залізничної колії та середньоквадратичне відхилення як функцію кривизни колії та пропущеного тоннажу. В основу моделі покладено нормальний розподіл вилучення рейок за дефектами та пошкодженнями.

Використання цієї моделі дозволяє розробити науково-обґрунтовані рекомендації для визначення нормативного тоннажу суцільної заміни рейок, залежно від встановленого для залізниць гамма-ресурсу їх виходу з урахуванням експлуатаційних факторів залізничної колії.

Проводились исследования работы рельсов, эксплуатирующихся в условиях метрополитена, существенно отличающейся от их работы в магистральном пути. Поэтому требования к их надежности должны отвечать условиям безопасности движения поездов. Существующая нормативная база по сплошной замене рельсов для метрополитенов применялась, как и для магистрального пути, не учитывая дифференцированно кривизну железнодорожного пути.

На основании использования теории надежности и теории вероятностей предложена математическая модель для описания постепенных отказов рельсов в реальных условиях метрополитена, которая учитывает пропущенный тоннаж, кривизну железнодорожного пути и среднеквадратичное отклонение как функцию кривизны пути и пропущенного тоннажа. В основу модели положено нормальное распределение изъятия рельсов из-за дефектов и повреждений.

Использование этой модели позволяет разработать научно-обоснованные рекомендации для определения нормативного тоннажа для сплошной замены рельсов, в зависимости от установленного для железных дорог гамма-ресурса их выхода с учетом эксплуатационных факторов железнодорожного пути.

The investigations were made on the rails which are maintained in the underground conditions. They essentially distinguish from their work in the main way. Therefore the requirements to their reliability should answer conditions of traffic safety of trains. The existing normative base on continuous replacement of rails for undergrounds was applied, as well as for a main way, without consideration curvature of a railway track.

On the basis of use of the theory of reliability and the theory of probability the mathematical model for the description of gradual refusals of rails in real conditions of underground which takes into account the passed tonnage, curvature of a railway track and a root-mean-square rejection as function of curvature of a way and the passed tonnage is offered. The normal distribution of withdrawal of rails because of defects and damages is set in the basis of the model.

The usage of this model allows to develop scientifically - substantiated recommendations for definition of the normative tonnage for continuous replacement of rails. It depends on established for railways scale of their exit taking into account operational factors of a railway.

Залізнична колія в метрополітені суттєво відрізняється від магістральної колії по устрою, плану та профілю колії, експлуатаційним факторам, таким як: швидкість руху поїздів, режимам ведення поїзда, частоті навантаження та інших факторів. Перелічені фактори принципово обумовлюють специфіку роботи рейок у метрополітені. Враховуючи вимоги до безпеки руху поїздів необхідно знати основні закономірності виходу елементів зі строю.

Існуючі норми, що діють в метрополітенах, застосовуються такі ж як і на залізницях без врахування особливих умов експлуатації у метрополітенах. Це значно обмежує подальше ра-

ціональне використання елементів верхньої будови колії (особливо рейок), які ще не повністю використали свій експлуатаційний ресурс і придатні до подальшої роботи в колії.

В даних складних умовах вимоги до терміну строку служби рейок залежно від кривизни залізничної колії повинні бути більш диференційованими.

В основному дослідження проводилися в напрямку, що закономірності виходу рейок підпорядковані степеневому закону при обмеженості статистичних даних [1]. Така спрощена модель дає завищені результати при пропущеному тоннажі 150–200 млн т і вище. Таким

чином, враховуючи недоліки цієї моделі, важко визначити подальшу перспективу роботи рейок, які ще не використали повністю свій експлуатаційний ресурс.

Для розробки математичної моделі були використані дані Харківського метрополітену. Масив даних включав 632 рейки з дефектами та пошкодженнями і містив практично декілька повних циклів експлуатаційної роботи рейок в Харківському метрополітені як по окремим лініям, так і в цілому, що дозволило встановити різні види пошкоджень і дефектів рейок на початковій стадії їх роботи, а також виконати дослідження інтенсивності раптових та поступових відмов в період експлуатації рейок. Та-

кий підхід надав можливість виділити основні групи найбільш типових дефектів та пошкоджень, що було покладено в основу розробки математичної моделі роботи рейок залежно від пропущеного тоннажу та кривизни залізничної колії.

Дані про розподіл виходу рейок в процентному визначенні наведено на рис. 1, з якого видно, що основними є дефекти 11.1, 2, 3 контактно-утомленого походження, які розвиваються у головці рейки з причин недостатньої контактно-утомленої міцності рейкової сталі. Особливо підлягають пошкодженню дефектом 11 рейки, які експлуатуються у кривих ділянках колії.

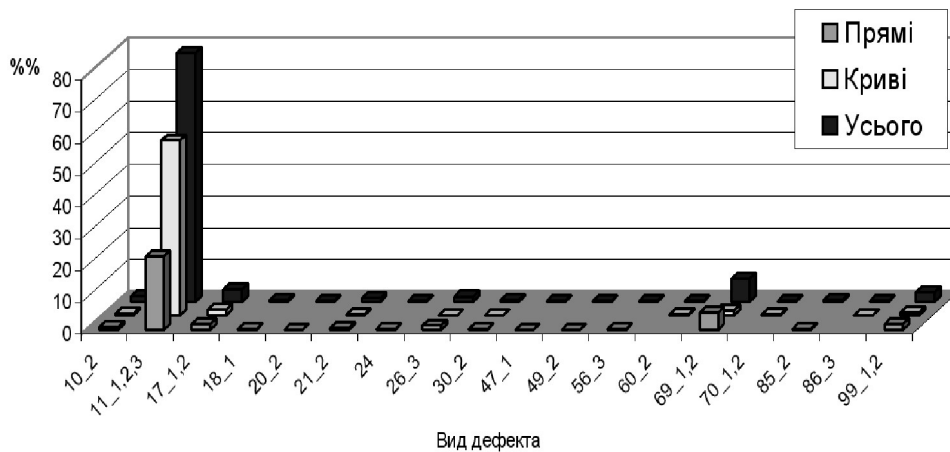


Рис. 1. Загальний розподіл виходу рейок по дефектам та пошкодженням

Кількість інших дефектів та пошкоджень не перевищує 1–3 % від загального виходу рейок.

В основу розробки математичної моделі для показників надійності закладені методи теорій імовірностей, надійності та математичної статистики. Головними критеріями оцінки стану елементів залізничної колії повинні стати показники, які повністю характеризують їх надійність в період експлуатації в межах встановленого нормативного тоннажу або часу.

Залізнична колія розглядається, як відновлювальний об'єкт з окремих елементів (80 рейок на один кілометр).

Середній тоннаж безвідмовної роботи рейок для довільного закону розподілу визначають, як математичне очікування випадкової величини

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t a(t) dt. \quad (1)$$

де  $a(t)$  – частота відмов.

Значення частоти відмов для конкретного об'єкту або елемента у статистичному вигляді можна визначити як [2; 3]

$$a(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

де  $N_0$  – число елементів на початок експлуатації;  $n(\Delta t)$  – число відмов елементів в інтервалі пропущеного тоннажу від  $t - \Delta t / 2$  до  $t + \Delta t / 2$ .

У ролі якісної характеристики надійності для відбудовних систем важливим параметром є параметр потоку відмов. Він характеризує відношення числа елементів, які відмовили в одиницю пропущеного тоннажу до загального числа елементів, що експлуатуються, при умові, що всі елементи, які відмовили замінюються новими або відремонтованими, тобто

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \Delta t}. \quad (3)$$

При виборі закону розподілу необхідно мати на увазі, для яких відмов він буде застосовуватися. Прироботочні та раптові відмови, як правило, описуються експоненційним законом, коли інтенсивність їх появи приймається постійною.

Нормальний закон розподілу найбільш часто використовується для оцінки надійності елементів при наявності поступових відмов [4] і щільність імовірності задається рівнянням

$$\omega(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T-\bar{T})^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

де  $\bar{T}$  – середнє напрацювання до відмови рейки, млн т;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення, млн т.

При нормальному розподілу випадкова величина може приймати значення від  $-\infty$  до  $+\infty$ , а час безвідмовної роботи може бути тільки позитивним, то зрізаний нормальний розподіл має вигляд

$$\omega(T) = \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T-\bar{T})^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

де  $C$  – нормуючий множник, визначається з виразу

$$C \int_0^{\infty} \omega(T) dt = 1 \quad (6)$$

і дорівнює

$$C = \frac{1}{F\left(\frac{\pi}{\sigma}\right)} = \frac{1}{0,5 + \Phi_0\left(\frac{\pi}{\sigma}\right)}, \quad (7)$$

де  $F\left(\frac{\pi}{\sigma}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\pi/\sigma} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$  – табульована інтегральна функція нормального розподілу [5; 6];

$$\Phi_0\left(\frac{\pi}{\sigma}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/\sigma} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (8)$$

де  $\Phi_0\left(\frac{\pi}{\sigma}\right)$  – нормована функція Лапласа, яка приймається з таблиць.

Середнє напрацювання до відмови та параметр  $T_1$  зрізаного нормального розподілу пов'язані залежністю

$$\bar{T} = T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} \cdot F\left(\frac{\pi}{\sigma}\right)} \cdot e^{-\frac{T_1^2}{2\sigma^2}}. \quad (9)$$

Для визначення динаміки виходу рейок залежно від пропущеного тоннажу розрахунки параметрів частоти відмов було виконано по формулі:

$$\omega(T) = \frac{n(\Delta T)_{i,j}}{N_0 \Delta T}, \quad (10)$$

де  $n(\Delta T)$  – кількість рейок, які були замінені, шт./км;  $\Delta T$  – пропущений тоннаж, приймався 25 млн т. брутто;  $i, j$  – фактори впливу на вихід рейок, відповідно: радіус кривої та пропущений тоннаж.

На основі чисельних значень параметру потоку відмов були одержані емпіричні дані про сумарний вихід рейок залежно від радіусу кривої

$$\sum n(\Delta T) = \omega(T) \Delta T N_0. \quad (11)$$

Таким чином статистична обробка результатів, а також якісний аналіз, дозволили зробити вибір факторів, які безпосередньо впливають на вихід рейок, це – пропущений тоннаж та кривизна колії.

В імовірнісному уявленні на відповідній частині щільності параметру потоку відмов та щільності частоти відмов не має великої розбіжності, то можна припустити  $\omega(T) \approx a(T)$ , тобто

$$\omega(T) = a(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-\bar{T})^2}{2\sigma^2}}. \quad (12)$$

Інтегральна функція виходу рейок або сумарний вихід рейок на 1 км колії в функції пропущеного тоннажу буде мати вигляд:

$$F(T, R) = \sum_1^T \omega(T, R) = \frac{N}{\sigma(R)\sqrt{2\pi}} \int_0^T e^{-\frac{[T-\bar{T}(R)]^2}{2\sigma^2(R)}} dt. \quad (13)$$

Враховуючи, що  $\bar{T} = f(R)$  та  $\sigma = f(R)$  запропоновано вираз для математичного очікування та середнього квадратичного відхилення у вигляді

$$\bar{T}(R), \sigma(R) = a + b \ln(R), \quad (14)$$

де  $a, b$  – емпіричні коефіцієнти, які знаходяться методом найменших квадратів за експериментальними даними.

Графіки  $\bar{T} = f(R)$  та  $\sigma = f(R)$  наведені на рис. 2.

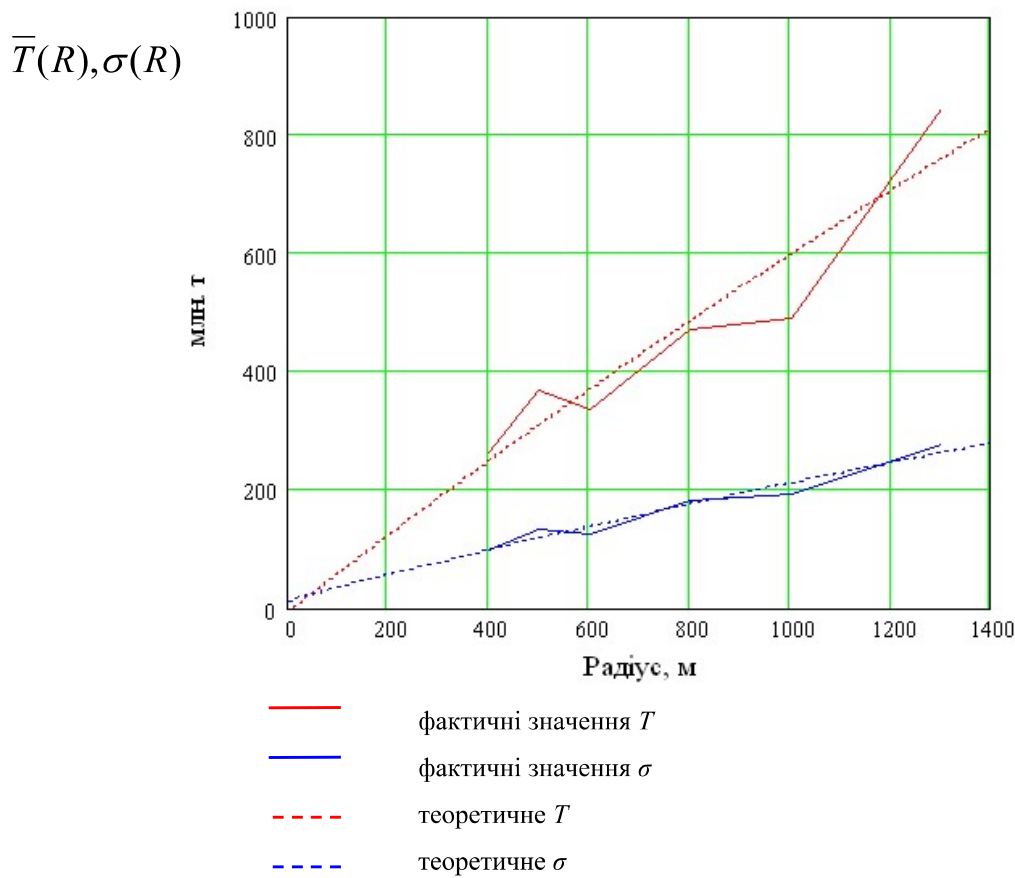


Рис. 2. Залежність середнього значення  $\bar{T}(R)$  та середньоквадратичного відхилення ( $\sigma$ ) від кривизни колії

Відповідно (7) інтегральні функції виходу рейок для  $i$ -го радіуса описується виразом:

$$F_i(T, R_i) = \sum_0^T \omega_i(T, R_i) = \frac{N}{\sigma(T, R_i) \sqrt{2\pi}} \int_0^T e^{-\frac{[T-\bar{T}(R_i)]^2}{2\sigma^2(T, R_i)}} dt.$$

Використовуючи отримані функції були побудовані графіки сумарного виходу рейок залежно від пропущеного тоннажу для кожного з радіусів (рис. 3).

В результаті проведених досліджень були встановлені основні групи дефектів, які сприяють видаленню рейок з колії у метрополітені.

Основним видом дефектів – є дефекти контактно-утомленого походження.

Запропонована математична модель для поступових відмов рейок в реальних умовах метрополітену, яка враховує пропущений тоннаж, кривизну залізничної колії та середньоквадратичне відхилення як функцію кривизни колії та пропущеного тоннажу.

Використання цієї моделі дозволяє розробити науково-обґрунтовані рекомендації для визначення нормативного тоннажу суцільної заміни рейок, залежно від встановленого для залізниць гамма-ресурсу їх виходу з урахуванням експлуатаційних факторів залізничної колії.

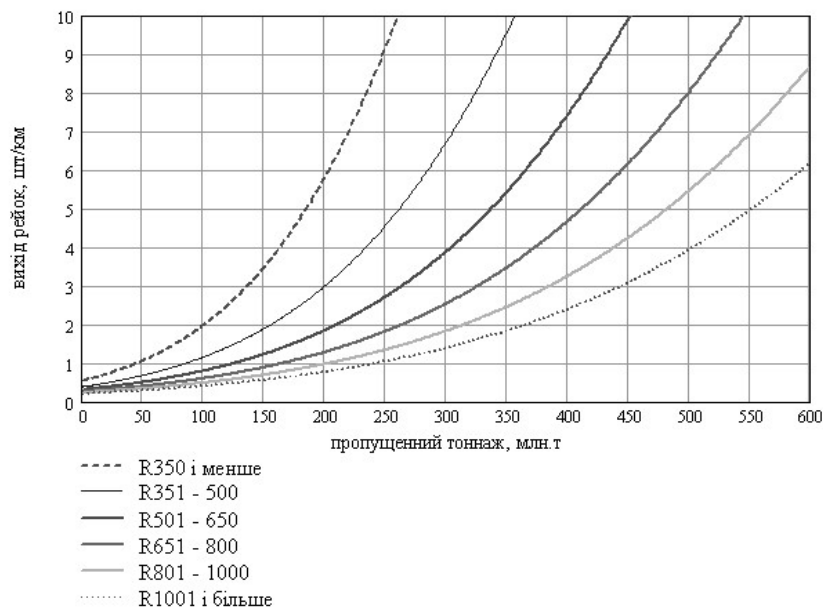


Рис. 3. Інтегральні криві виходу рейок в функції пропущеного тоннажу та радіусу кривій

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Шульга В. Я. Об учете эксплуатационных факторов при определении изъятия рельсов и норм межремонтного тоннажа // Сферы рационального применения конструкции верхнего строения пути. — М.: Транспорт, 1965. — Вып. 182. — С. 105–135.

2. Козлов Б., Ушкалов И. Справочник по расчету надежности. — М.: «Советское радио», 1966. — 431 с.

3. Половко А. М, Маликова И. М. Справочник задача по теории надежности. - М.: «Советское радио», 1972. — 407 с.

4. Рыбкин В. В. Оптимизация системы ведения путевого хозяйства в новых условиях эксплуатации железнодорожного транспорта Украины: Дис... д-ра тех. наук: 05.22.06. — Д., 1999. — 416 с.

5. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений — М.: Наука, 1971. — 577 с.

6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике — М.: Наука, 1980. — 968 с.