

УДК 625...656

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Кандидати техн. наук Д. О. Потапов, В. Г. Вігольберг, асп. С. С. Чесак

## ANALYTICAL REVIEW OF MODERN METHODS FOR ASSESSING THE CONDITION OF THE RAILWAY TRACK

PhD (Tech) D. O. Potapov, PhD (Tech) V. G. Vitolberg,  
postgraduate student S. S. Chesak

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301999>



*Анотація.* Підтримання залізничної колії в належному стані потребує постійного моніторингу її параметрів. Одним із головних показників є положення колії у просторі і часі. Це положення характеризується такими показниками, як повздовжній і поперечний профілі, положення колії в плані, перекося колії, ширина колії. Ці параметри безпосередньо впливають на динаміку взаємодії рухомого складу та залізничної колії. Різниця між фактичним і проєктним положеннями за кожним параметром може призводити до обмеження швидкості, а в деяких випадках і повного закриття руху по ділянці. Крім того, аналіз цих параметрів дає змогу на ранніх стадіях виявляти критичні стани та планувати профілактичне обслуговування. Але для комплексної оцінки стану залізничної колії доцільно розглядати не один окремий параметр, а їхню сукупність. За останні роки в різних країнах були проведенні численні дослідження, спрямовані на пошук найбільш об'єктивного індексу якості колії (Track Quality Index, TQI). Індокси якості колії – це абстрактні величини, що об'єднують і обчислюють за певним алгоритмом дані, отримані від колієвимірювальних засобів. Результатом виконаних обчислень є певна числова величина, яка характеризує стан окремої ділянки колії. Це дає змогу порівняти між собою різні ділянки, знайти найбільш пріоритетні для ремонту місця і спланувати роботи з поточного утримання колії. Аналіз бази даних із послідовних вимірювань однієї ділянки та експлуатаційних умов на ній дає змогу

розрахувати швидкість деградації геометричних параметрів колії, що у свою чергу створює передумови для прогнозування появи несправностей.

**Ключові слова:** *індекс якості колії, стандартне відхилення, геометрія колії, оцінка стану колії.*

**Abstract.** *Maintaining a railroad track in good condition requires constant monitoring of its parameters. One of the main indicators is the track position in space and time. This position is characterized by such indicators as longitudinal and transverse profile, track position in plan, track distortions, track width. These parameters directly affect the dynamics of interaction between rolling stock and railway track. The difference between the actual and design positions for each parameter can lead to speed restrictions and, in some cases, to the complete closure of traffic on the section. In addition, the analysis of these parameters makes it possible to identify critical conditions at an early stage and plan preventive maintenance. However, for a comprehensive assessment of the condition of a railroad track, it is advisable to consider not one single parameter, but their combination. In recent years, numerous studies have been conducted in different countries to find the most objective Track Quality Index (TQI). Track quality indices are abstract values that combine and calculate data obtained from track measuring instruments according to a certain algorithm. The result of the calculations is a certain numerical value that characterizes the condition of a particular section of track. This makes it possible to compare different sections with each other, find the highest priority areas for repair, and plan track maintenance work. The analysis of the database of consistent measurements of one section and the operating conditions on it makes it possible to calculate the rate of degradation of the geometric parameters of the track. This, in turn, creates prerequisites for predicting the occurrence of faults. This paper aims to consider different approaches to assessing the geometric parameters of a railway track using track quality indices.*

**Keywords:** *track quality index, standard deviation, track geometry, track condition assessment.*

**Визначення мети та завдання дослідження.** Узагальнення світового досвіду з оцінювання стану основних геометричних параметрів залізничної колії. Аналіз і порівняння сучасних методів оцінювання стану колії з чинною в Україні системою. Пошук потенційних інструментів для розроблення математичної моделі прогнозування накопичення залишкових деформацій залізничної колії, що дасть змогу попереджати появу несправностей колії.

**Вступ.** На сьогодні залізничний транспорт України працює в складних умовах. З одного боку, вітчизняна транспортна інфраструктура має задовольняти потреби країни в пасажирських і вантажних перевезеннях, а з іншого – у зв'язку з важкою економічною ситуацією необхідно раціонально використовувати обмежені матеріально-технічні ресурси. Для забезпечення

достатнього рівня безпеки перевезень в умовах воєнного стану необхідно більш гнучко планувати ремонтно-колійні роботи виходячи з фактичного стану колії, наявності необхідних матеріалів і техніки.

Залізнична колія – це інженерна споруда, на яку діє велика кількість статичних і динамічних навантажень. Під дією динамічного навантаження від рухомого складу та інших зовнішніх факторів у колії накопичуються дефекти і залишкові деформації.

Існує три аспекти зносу колії:

- субструктурний (тобто деградація підрейкової основи колії);
- надструктурний (тобто деградація верхньої будови колії);
- геометричний (тобто деградація геометрії колії) [4].

У перших двох аспектах модель деградації колії базується на зростанні

фізичних структурних умов. Досліджено параметри, що впливають на деградацію колії, включаючи пропускну спроможність, швидкість руху поїздів, характеристики баласту, типи рейок тощо, і проаналізовано кореляцію між ними для виведення загального рівняння, яке кількісно визначає швидкість деградації. І навпаки, моделі деградації колії у другому аспекті використовують геометричні параметри як основні критерії деградації. Для того щоб виміряти стан колії за допомогою цієї моделі, зазвичай колію розбивають на декілька коротших ділянок і для кожної з них виконують статистику геометричних параметрів. Потім статистичні дані про геометрію підсумовують, щоб отримати загальну оцінку якості ділянки, яку зазвичай називають індексом якості колії (Track Quality Index, TQI). Використання TQI дає можливість оцінити показники експлуатаційних характеристик залізничної колії, розробити заходи і порівняти характеристики колії до і після проведення заходів [5].

Тому регулярний моніторинг цих параметрів є важливим і невід'ємним етапом у плануванні робіт з поточного утримання та ремонту колії. Якісний аналіз стану колії дає змогу визначити найбільш критичні ділянки, які потребують ремонту, попередити розвиток дефектів до критичних значень, ефективно розподілити ресурси і спланувати об'єми та види робіт.

**Основна частина.** На сьогодні в Україні головним інструментом для вимірювання геометрії колії є комп'ютеризований вагон-лабораторія КВЛ-П. Вагон має можливість вимірювати такі параметри колії: взаємне положення рейок за висотою, місцеві осідання за кожною рейкою окремо, ширина колії, положення рейкових ниток за напрямком у плані. Також перевіряється непогашене прискорення та швидкість зміни непогашеного прискорення [16].

Для оцінювання отриманих значень встановлено п'ять ступенів відступів від норм утримання рейкової колії.

I ступінь – відступи в межах допусків, при яких забезпечено безпеку та плавність руху поїздів.

II ступінь – відступи, які не потребують зменшення встановленої швидкості, не загрожують безпеці руху поїздів, але впливають на плавність руху.

III ступінь – відступи, які не потребують зменшення встановленої швидкості, не загрожують безпеці руху поїздів, але впливають на плавність руху та інтенсивність накопичення залишкових деформацій.

IV ступінь – відступи, наявність яких за встановлених швидкостях погіршує плавність руху і призводить до інтенсивного накопичення залишкових деформацій колії.

V ступінь – відступи, які викликають зростання сил взаємодії колії та рухомого складу до таких критичних значень, що за наявності несприятливих поєднань із відступами в утриманні та завантаженні рухомого складу, порушеннями ведення поїзда, іншими умовами можуть призвести до швидкого зростання деформацій і виникнення загрози безпеці руху [15].

За кожний відступ III-V ступенів за кожний параметр нараховують штрафні бали. Сума балів вказує на загальний стан колії на кожному кілометрі (табл. 1).

Європейський стандарт EN 13848-5:2017 встановив три показники, які можуть бути використані для опису геометричної якості колії:

- екстремальні значення ізольованих дефектів. Частина сигналу, що вимірює певний параметр, яка перевищує встановлену межу принаймні в одній точці для кроку вимірювання 0.25 м;

- середньоквадратичне (стандартне) відхилення на визначеній довжині, зазвичай 200 м. Стандартне відхилення використовують для подання варіації даних вимірювання геометрії колії. Низьке стандартне відхилення вказує на те, що вимірювання геометрії близькі до середнього значення, а високе стандартне відхилення вказує на те, що вимірювання

геометрії мають велику варіацію навколо середнього значення. Можна стверджувати,

що вище стандартне відхилення відображує більше нерівностей на колії [13];  
- середнє значення.

Таблиця 1

Якісна оцінка колії за показаннями колієвимірального вагона

Оцінка	Сума балів за всі відступи на 1 км			
	Колії з непротер- мінованим капремонтом	Колії з протер- мінованим капремонтом	Колії з $V_{\max} \leq 60$ км/год	Колії з $V_{\max} \leq 40$ км/год
Відмінно	0-40	0-70	0-100	0-250
Добре	41-100	71-140	101-150	251-500
Задовільно	101-500	141-500	151-500	501-800
Незадовільно	$\geq 501$	$\geq 501$	$\geq 501$	$\geq 801$

Також на динаміку руху поїзда впливають як фактична величина відхилення, так і довжина цього відхилення. Встановлено три діапазони хвиль для вимірювання ізольованих дефектів, а також розрахунку стандартного відхилення ділянки колії:

- D1 – хвилі довжиною  $3 \text{ м} < \lambda \leq 25 \text{ м}$ ;
- D2 – хвилі довжиною  $25 \text{ м} < \lambda \leq 70 \text{ м}$ ;

D3 – хвилі довжиною  $70 \text{ м} < \lambda \leq 150 \text{ м}$  для повздовжнього профілю,  $70 \text{ м} < \lambda \leq 200 \text{ м}$  для положення в плані [14].

Геометричні параметри колії та спосіб вимірювання наведено в табл. 2.

Діапазоном довжин хвиль D3 нехтують, оскільки він не пов'язаний безпосередньо з безпекою руху, а більше комфортом руху транспортного засобу [14].

Таблиця 2

Параметр колії та спосіб вимірювання

Параметр	Спосіб вимірювання
Ширина колії	Екстремальні значення ізольованих дефектів. Відхилення ширини колії від середнього значення, виміряного на ділянці понад 100 м
Повздовжній рівень	Ізольовані дефекти – від нуля до пікового значення. Для $V_{\max} \leq 160$ км/год – довжина хвиль у діапазоні D1. Для $160 < V_{\max} \leq 360$ км/год – довжина хвиль у діапазонах D1 і D2
Рівень головок рейок	Абсолютне значення. Стандартом [14] не встановлені порогові значення для поперечного рівня головок рейок, оскільки цей параметр залежить від конструкції колії, будівельних правил, конструкції рухомого складу та типу експлуатації конкретної лінії
Положення в плані	Ізольовані дефекти – від нуля до пікового значення. Для $V_{\max} \leq 160$ км/год – довжина хвиль у діапазоні D1. Для $160 < V_{\max} \leq 360$ км/год – довжина хвиль у діапазонах D1 і D2
Перекуси колії	Екстремальні значення ізольованих дефектів. Пікові значення визначаються залежно від протяжності відхилення та конструкції колії

Стандартом EN 13848-5:2017 встановлено порогові значення ізольованих дефектів AL, ІL та ІAL для кожного параметра. Перевищення цих значень потребує певної реакції:

AL (Alert Limit) – ліміт тривоги. Потребує аналізу стану геометрії колії та врахування його при виконанні планових робіт із технічного обслуговування;

ІL (Intervention Limit) – ліміт втручання. Потребує проведення корегувальних робіт для того, щоб величина

відхилення не досягнула критичних значень;

ІAL (Immediate Action Limit) – ліміт негайної дії. Потребує вжиття заходів для зниження ризику сходу з рейок. Це може бути зроблено шляхом закриття лінії, зниження швидкості або невідкладної корекції геометрії колії.

Порогові значення ізольованих дефектів за кожним параметром для AL, ІL та ІAL наведено в табл. 3-5 [14].

Таблиця 3

Порогові значення ізольованих дефектів для AL

Швидкість	Ширина колії, мм	Ширина колії відносно середнього значення на ділянці більше 100 м, мм	Повздовжній рівень, мм		Положення в плані, мм		Перекося колії, виміряні на довжині 3 м, мм/м
			Довжина хвиль		Довжина хвиль		
			D1	D2	D1	D2	
$V \leq 80$	-7/+25	-6/+25	12-18	-	12-15	-	4
$80 < V \leq 120$	-7/+25	-5/+16	10-16	-	8-11	-	4
$120 < V \leq 160$	-6/+25	-3/+16	8-15	-	6-9	-	4
$160 < V \leq 230$	-4/+20	-3/+16	7-12	12-16	5-8	10-14	4
$230 < V \leq 300$	-3/+20	-1/+16	6-10	8-12	4-7	8-10	3
$300 < V \leq 360$	-3/+20	-/+16	6-8	8-10	3-6	6-8	3

Таблиця 4

Порогові значення ізольованих дефектів для ІL

Швидкість	Ширина колії, мм	Ширина колії відносно середнього значення на ділянці більше 100 м, мм	Повздовжній рівень, мм		Положення в плані, мм		Перекося колії, виміряні на довжині 3 м, мм/м
			Довжина хвиль		Довжина хвиль		
			D1	D2	D1	D2	
$V \leq 80$	-9/+30	-7/-	17-21	-	15-17	-	5
$80 < V \leq 120$	-9/+30	-6/+20	13-19	-	11-13	-	5
$120 < V \leq 160$	-8/+30	-4/+20	10-17	-	8-10	-	5
$160 < V \leq 230$	-5/+23	-4/+20	9-14	14-20	7-9	12-16	5
$230 < V \leq 300$	-4/+23	-2/+20	8-12	10-14	6-8	10-12	4
$300 < V \leq 360$	-4/+23	-1/+20	7-10	8-12	5-7	8-10	4

Таблиця 5

## Порогові значення ізольованих дефектів для IAL

Швидкість	Ширина колії, мм	Ширина колії відносно середнього значення на ділянці більше 100 м, мм	Повздовжній рівень, мм		Положення в плані, мм		Перекуси колії, виміряні на довжині 3 м, мм/м
			Довжина хвиль		Довжина хвиль		
			D1	D2	D1	D2	
$V \leq 80$	-11/+35	-8/-	28	-	22	-	7
$80 < V \leq 120$	-11/35	-7/-	26	-	17	-	7
$120 < V \leq 160$	-10/+35	-5/-	23	-	14	-	7
$160 < V \leq 230$	-7/+28	-5/-	20	24	12	18	7
$230 < V \leq 300$	-5/+28	-3/-	16	18	10	14	5
$300 < V \leq 360$	-5/28	-2/-	14	16	8	12	5

Для загальної оцінки геометрії певної ділянки колії використовують різні методики. Багато країн Європи та Азії використовують стандартне відхилення в

основі розрахунку якості колії, але є країни, які використовують інші алгоритми. Нижче наведені країни та описані індекси якості колії, які в них використовуються (табл. 6).

Таблиця 6

## Сучасні індекси оцінювання стану колії

Номер	Країна	Назва	Формула розрахунку
1	2	3	4
Індекси з використанням стандартного відхилення			
1	Великобританія	індекс SD	$\sum_{i=1}^7 \sigma_i$
2	Польща	Синтетичний коефіцієнт J	$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0.5 \cdot S_e}{3.5}$
3	Швеція	індекс Q індекс K	$\sigma_i = 150 - 100 \left( \frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} + 2 \cdot \frac{\sigma_S}{\sigma_{Slim}} \right) / 3$ $K = \frac{\sum l}{L} \cdot 100\%$
4	Канада	TQI	$TQI = \frac{\sum_{i=1}^6 TQI_i}{6}$
5	Нідерланди	$Q_N$	$Q_N = 10 \times 0.675^{\sigma_i / \sigma_i}$
6	Індія	TGI	$TGI = \frac{2UI + TI + GI + 6AI}{10}$
Індекси без використання стандартного відхилення			
7	Польща	П'ятипараметричний індекс	$W_5 = 1 - (1 - W_e) \cdot (1 - W_g) \cdot (1 - W_w) \cdot (1 - W_x) \cdot (1 - W_y)$

1	2	3	4
8	США	Індекс нерівностей колії	$R^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2$
9	США	FRA TQI	$TQI = \left(\frac{L_i}{L_0} - 1\right) \cdot 10^6$
10	Японія	P	–
11	Індонезія	TQI	–

Далі наведено більш розгорнутий опис підходів і методів, використовуваних для загальної оцінки геометрії залізничної колії на закордонних залізницях.

**1. Великобританія.** На залізницях Великобританії, а також Австралії та Китаю використовують **SD** (standard deviation) – індекс стандартного відхилення [12]. Його розраховують як суму стандартних відхилень  $\sigma_i$  за сімома параметрами колії: повздовжній рівень (ліва та права рейки окремо), положення колії в плані, ширина колії, положення однієї рейки за рівнем відносно іншої, поперечний рівень (ліва та права рейки окремо), за формулами

$$SD = \sum_{i=1}^7 \sigma_i, \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^2 - \bar{x}_i^2)}, \quad (2)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}, \quad (3)$$

де  $\sigma_i$  – стандартне відхилення за кожним параметром;

$x_{ij}$  – вимірний параметр;

$\bar{x}_i$  – середнє відхилення;

$n$  – кількість виконаних вимірювань.

**2. Польща.** На залізницях Польщі використовують синтетичний коефіцієнт  $J$  [5] – середньоарифметичне від чотирьох розрахованих стандартних відхилень. Вплив

відхилень за шириною колії на коефіцієнт  $J$  зменшено у два рази відносно інших параметрів. Для розрахунку синтетичного коефіцієнта  $J$  використовують формулу

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0.5 \cdot S_e}{3.5}, \quad (4)$$

де  $S_z$  – вертикальні відхилення;

$S_y$  – горизонтальні відхилення;

$S_w$  – відхилення положення рейкової колії в плані;

$S_e$  – стандартне відхилення за шириною колії.

Стандартне відхилення  $S$  за кожним вимірним параметром розраховують за формулою

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5)$$

де  $n$  – кількість вимірювань, виконаних на ділянці, стан якої аналізують;

$x_i$  – значення геометричних параметрів у точці  $i$ ;

$\bar{x}$  – середнє значення вимірних сигналів.

Для різних швидкостей руху встановлено відповідні максимально допустимі значення коефіцієнта  $J$  (табл. 7). У випадку перевищення цих значень необхідно виконати роботи з покращення стану колії.

Таблиця 7

Допустимі значення синтетичного коефіцієнта J залежно від встановленої швидкості

Встановлена швидкість, км/год	Допустимий коефіцієнт J, мм	Встановлена швидкість, км/год	Допустимий коефіцієнт J, мм
80	7.0	150	2.3
90	6.2	160	2.0
100	5.5	170	1.7
110	4.9	180	1.6
120	4.0	190	1.5
130	3.5	200	1.4
140	2.8	220 <sup>1</sup>	1.1

**3. Швеція.** Індексом Q та K користуються не тільки у Швеції, але і Норвегії та Данії. Як і інші показники, в основі яких закладено розрахунок стандартного відхилення, Q та K дають загальну оцінку стану колії на певних ділянках. Але їх не можна використовувати для ідентифікації точкових дефектів. Відповідно до робіт [7, 8] розрахунок базується на визначенні чотирьох геометричних стандартних відхилень:

- повздовжній рівень  $\sigma_H$ ;
- положення в плані  $\sigma_V$ ;
- рівень головок рейок  $\sigma_R$ ;
- комбінований параметр  $\sigma_S$  (ширина колії, положення колії в плані, рівень головок рейок).

Як правило, індекс Q розраховують для ділянок довжиною 200 м. Формула для розрахунку має загальний вигляд:

$$\sigma_i = 150 - 100 \left( \frac{\sigma_H}{\sigma_{Hlim}} + 2 \cdot \frac{\sigma_S}{\sigma_{Slim}} \right) / 3, \quad (6)$$

де  $\sigma_H$  – середнє стандартне відхилення повздовжнього рівня для лівої та правої рейок, мм;

$\sigma_S$  – комбінований параметр, мм;

$\sigma_{Hlim}$  – допустиме середнє стандартне відхилення повздовжнього рівня для лівої та правої рейок, мм;

$\sigma_{Slim}$  – допустиме відхилення комбінованого параметра.

$\sigma_{Hlim}$  і  $\sigma_{Slim}$  залежать від класу колії або допустимої швидкості руху (табл. 8). Порогові значення для Q становлять від 50 до 100, допустимі – 70-90 [2].

Таблиця 8

Порогові значення стандартних відхилень для розрахунку індексів Q та K

Клас колії	Допустима швидкість	Повздовжній рівень $\sigma_H$	Рівень головок рейок $\sigma_R$	Положення в плані $\sigma_V$	Комбінований параметр $\sigma_S$
K0	145-	1,1	0,9	1,1	1,6
K1	125-140	1,3	1,0	1,2	1,7
K2	105-120	1,5	1,2	1,3	1,9
K3	75-100	1,9	1,4	1,7	2,4
K4	40-70	2,4	1,8	2,0	3,1
K5	-35	2,9	2,2	2,4	3,6



Індекс  $K$  розраховують для ділянок колії довжиною 1000 м як [7, 8]

$$K = \frac{\sum l}{L} \cdot 100\% , \quad (7)$$

де  $\sum l$  – сума довжин колії, де значення  $\sigma_i$  виходить за межі порогових значень і відповідності класу колії;

$L$  – загальна довжина ділянки обстеження.

Індекс  $K$  недоцільно використовувати для коротких ділянок колії.

**4. Канада.** Для визначення індексу якості колії на Канадській національній залізниці використовують шість головних геометричних параметрів колії: повздожній профіль і положення в плані (для обох рейкових ниток окремо), рівень головок рейок і ширину колії [11]. Для розрахунку використовують поліном другого порядку для стандартного відхилення:

$$TQI_i = 1000 - C + \sigma_i^2. \quad (8)$$

де  $C$  – константа, яка залежить від категорії колії (700 – для головних колій);

$\sigma_i^2$  – квадрат стандартного відхилення для кожного параметра.

Загальний показник якості колії обчислюють як середньоарифметичне від отриманих результатів. Чим більший показник  $TQI$ , тим кращий стан колії [2].

$$TQI = \frac{\sum_{i=1}^6 TQI_i}{6}. \quad (9)$$

**5. Нідерланди.** Нідерландський індекс якості колії  $Q_N$  розроблений з урахуванням

того, що 20 % залізничних ліній країни рекомендовані до виконання виправно-підбивальних робіт колійними машинами. Він є більш гнучким до різних категорій колій.

Для визначення 20 % ділянок, які мають найгірші показники, ділянку колії довжиною 5-10 км поділяють на секції 200 м. Визначають  $Q_N$  для кожної секції та  $Q_N$  для всієї ділянки (з урахуванням 80 % стандартного відхилення для всієї ділянки). Порівнюють визначені показники  $Q_N$  між собою. Чим більше показник  $Q_N$ , тим кращий стан колії [9].

$$Q_N = 10 \times 0.675 \sigma_i / \sigma_i^{80}, \quad (10)$$

де  $\sigma_i$  – стандартне відхилення для кожного геометричного параметра. Визначають для ділянок довжиною 200 м;

$\sigma_i^{80}$  – 80-відсотковий квантиль, взятий від  $\sigma_i$ , визначеного на ділянці довжиною 5-10 км.

**6. Індія.** Індійський індекс  $TGI$  (Track Geometry Index), як і більшість інших попередніх індексів, розраховують для ділянок колії довжиною 200 м і в його основі лежить стандартне відхилення. Але вплив кожного параметра на значення  $TGI$  нерівномірний [1, 2]:

$$TGI = \frac{2UI+TI+GI+6AI}{10}, \quad (11)$$

де  $UI$  – повздожній рівень;

$TI$  – положення колії в плані;

$GI$  – ширина колії;

$AI$  – рівень головок рейок.

Кожну складову цього індексу розраховують за такою формулою:

$$UI, TI, GI, AI = 100 \cdot e^{-\left(\frac{SD_{mes}-SD_n}{SD_{maint}-SD_n}\right)}, \quad (12)$$

де  $SD_{mes}$  – стандартне відхилення вимірюваного параметра;

$SD_{maint}$  – допустиме стандартне відхилення при поточному утриманні колії;

$SD_n$  – допустиме стандартне відхилення для нової колії.

Порогові значення для  $SD_{maint}$  і  $SD_n$  наведено в табл. 9. Чим більше розрахований показник TGI, тим кращий стан колії (табл. 10) [5].

Таблиця 9

Порогові значення стандартного відхилення для  $SD_{maint}$  і  $SD_n$ , мм

Параметр	Довжина хорди	$SD_n$	$SD_{maint}$ для швидкості $\geq 105$ км/год	$SD_{maint}$ для швидкості $< 105$ км/год
$UI$	9.6	2.50	6.2	7.2
$TI$	3.6	1.75	3.8	4.2
$GI$	1.0	1.00	3.6	3.6
$AI$	7.2	1.5	3.0	3.0

Таблиця 10

Класифікація робіт із поточного утримання колії залежно від отриманого TGI

Номер	Показник TGI	Тип поточного обслуговування
1	$TGI > 80$	Не потребує виконання робіт
2	$50 < TGI < 80$	Потребує виконання базових робіт
3	$36 < TGI < 50$	Потребує виконання планових робіт
4	$TGI < 36$	Потребує виконання невідкладних робіт

**7. Польща.** П'ятипараметричний індекс якості колій позначають як  $W_5$ . Цей підхід розглядає дефектність кожного

геометричного параметра як незалежну подію на практиці [3, 10]:

$$W_5 = 1 - (1 - W_e) \cdot (1 - W_g) \cdot (1 - W_w) \cdot (1 - W_x) \cdot (1 - W_y), \quad (13)$$

де  $W_e$  – дефектність за шириною колії;

$W_g$  – рівень головок рейок по відношенню одна до одної;

$W_w$  – відхилення положення рейкової колії в плані;

$W_x$  і  $W_y$  – середньоарифметичні значення вертикальних і горизонтальних нерівностей, визначені на основі положення лівої та правої рейкових ниток.

Коефіцієнт дефектності кожного параметра  $W$  у цьому підході розраховують за формулою

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l}, \quad (14)$$

де  $l_i$  – довжина ділянки  $i$ , на якій перевищено допустиме значення  $W_e, W_g, W_w, W_x, W_y$  відповідно;

$l$  – загальна довжина ділянки дослідження;

$l$  – кількість перевищень допустимого порогу для вимірної ділянки.

Стан колії оцінюють на основі перевищення максимально допустимих

значень. Якісну оцінку стану колії залежно від величини  $W_5$  наведено в табл. 11 [1].

Таблиця 11

Стан колії залежно від отриманого  $W_5$

Оцінка колії	Нова колія	Добрий стан	Задовільний стан	Незадовільний стан
Показник $W_5$	$W_5 < 0.1$	$W_5 < 0.2$	$W_5 < 0.6$	$W_5 > 0.6$

**8. США.** Індекс нерівностей колії було розроблено в США національною залізничною компанією Amtrak. Оцінюють стан колії за чотирма параметрами: повздожній рівень, положення колії в плані, рівень головок рейок і ширина колії. Розраховують як відношення суми квадратів вимірювань відхилень до кількості вимірювань [2, 12]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}, \quad (15)$$

де  $d_i^2$  – квадрат відхилення за кожним параметром у точці  $i$ ;

$n$  – кількість вимірювань точок.

**9. США.** У 2000 році Управління досліджень і розробок Федеральної

залізничної адміністрації США ініціювало дослідження з розроблення нових індексів якості колії на основі фактичних даних про геометрію колії. У період із 2000 по 2002 рік було проведено широкомасштабне дослідження стану колії – більше третини залізниці країни.

В основі концепції лежить порівняння довжини просторової кривої з прямим відрізком, який об'єднує кінцеві точки цієї кривої. Чим більша нерівномірність ділянки колії, тим більша довжина просторової кривої, якщо розтягнути її у пряму лінію [6].

Розроблений індекс якості колії (FRA TQI) розраховують для ділянок колії довжиною 528 футів (160.93 м), крок вимірювань 1 фут (0,3048 м). Довжину просторової кривої між двома послідовними точками визначають за формулою [11]

$$L_i = \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{(y_{i(j+1)} - y_{ij})^2 + (x_{j+1} - x_j)^2}, \quad (16)$$

де  $L_i$  – довжина просторової кривої;

$n$  – кількість вимірювань;

$y_{ij}$  – значення вимірюваного параметра в точці  $j$ ;

$y_{i(j+1)}$  – значення вимірюваного параметра в точці  $j+1$ ;

$x_j$  – координата точки початку вимірювань;

$x_{j+1}$  – координата точки закінчення вимірювань.

Індекс якості розраховують для повздожнього профілю, положення в плані, рівня головок рейок і ширини колії.

$$TQI_i = \left( \frac{L_i}{L_0} - 1 \right) \cdot 10^6, \quad (17)$$

де  $L_0$  – теоретична довжина ділянки колії.

**10. Японія.** Індекс  $R$ , прийнятий на японських залізницях, є відношенням кількості точок відбору проб, вимірювання

параметрів якості яких виходять за межі  $\pm 3$  мм, до кількості всіх точок відбору проб на ділянці колії. Існує дві довжини відрізків колії, до яких застосовують індекс Р: 100 м і 500 м. Чим більший індекс Р, тим гірший відрізок колії в певному аспекті якості [12].

**11. Індонезія.** Стан колії оцінюють за чотири параметри: ширина колії, повздовжній профіль, положення колії в плані та рівня головок рейок. Відхилення за

кожним параметром потім підсумовують для отримання значення TQI. TQI не має одиниці вимірювання, тому що одиниця суми, мм, однакова, але відрізняється за вектором. Індонезійський TQI класифікують як чотири секції та перетворюють на категорію стану колії від I до IV. Класифікація категорії стану колій наведена в табл. 12 [9].

Таблиця 12

Класифікація стану залізничної колії в Індонезії

Параметр	Категорія 1	Категорія 2	Категорія 3	Категорія 4
Ширина колії	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
Повздовжній профіль	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
Положення в плані	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
Рівень головок рейок	0-5 мм	6-10 мм	11-15 мм	> 15 мм
TQI	0-20	21-40	41-60	> 60
Швидкість, км/год	$100 \leq V_{\max} \leq 120$	$80 \leq V_{\max} \leq 100$	$60 \leq V_{\max} \leq 80$	$V_{\max} < 60$
Стан колії	Комфорт	Безпечно	Умовно безпечно	Небезпечно
Тип обслуговування	Поточний ремонт	Плановий ремонт	Першочерговий ремонт	Невідкладний ремонт

**Висновки.** На сьогодні в переважній більшості систем оцінювання стану залізничної колії використовують комплексний підхід: з одного боку, виявлення ізольованих дефектів і встановлення для них граничних порогових значень, а з іншого – загальна оцінка ділянки колії з використанням єдиного показника на основі стандартних відхилень від норм утримання відповідних характеристик.

Об'єднання стандартного відхилення основних геометричних параметрів колії в один показник дає змогу певною мірою більш гнучко враховувати вплив основних видів несправностей і відхилень на загальний стан колії. Виходячи з того, що відповідні параметри мають різні амплітуди розподілу значень, (наприклад ширина колії

та повздовжній рівень), деякі методики намагаються нівелювати цей фактор, зменшуючи (коефіцієнт J, Польща) або збільшуючи (TGI, Індія) вплив певних параметрів на загальну оцінку колії. В окремих випадках використовують відношення розрахованого стандартного відхилення до емпірично визначеного стандартного відхилення для нової колії (індекс Q, Швеція). Також можна відзначити системи оцінювання, у яких при визначенні індексу якості колії не використовують стандартне відхилення, наприклад індекс нерівностей колії, запропонований американською компанією Amtrak.

Результати проведеного огляду наявних методів оцінювання можуть бути використані при розробленні пропозицій

щодо внесення змін і доповнень до чинної системи оцінювання стану колії на залізницях України, а також при проведенні досліджень з прогнозування зміни окремих

геометричних характеристик залізничної колії в процесі експлуатації для попередження появи несправностей і відхилень від норм утримання.

### Список використаних джерел

1. Daniel H/Michael, Elias Kassa, Getu Segni School of Civil and Environmental Engineering, African Railway Center of Excellence. *Journal of EEA*. Vol. 40, July 2022.
2. Stefan Offenbacher, Johannes Neuhold, Peter Veit and Matthias Landgraf Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI. *Appl. Sci.* 2020. 10(23). 8490. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238490>.
3. Andrzej Chudzikiewicz, Roman Bogacz, Mariusz Kostrzewski, Robert Konowrocki Condition monitoring of railway track systems by using acceleration signals on wheelset axle-boxes. *TRANSPORT*. ISSN 1648-4142, 2018. Vol. 33(2). 555–566.
4. Sadeghi J., Askarinejad H. Influences of track structure, geometry and traffic parameters on railway deterioration, *IJE Transactions B: Applications*. December 2007. Vol. 20. No. 3. 291.
5. Abdur Rohim Boy Berawi, Raimundo Delgado, Rui Calçada, Cecilia Vale Evaluating track geometrical quality through different methodologies. *International Journal of Technology*. (2010). 1: 38-47.
6. Dr. Magdy El-Sibaie, Ms. Sun Lee, Mr. Mo Fateh Development of Objective Track Quality Indices. *Research Results*. RR05-01. March 2005.
7. Christer Stenström Maintenance Performance Measurement of Railway Infrastructure with Focus on the Swedish Network, Division of Operation, Maintenance and Acoustics Engineering, Luleå University of Technology, Sweden May 2012. ISSN: 1402-1536.
8. Ambika Prasad Patra. Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses, Luleå University of Technology. *Printed by Universitetstryckeriet*. Luleå 2009. ISSN: 1402-1544.
9. Dian Setiawan M., Sri Atmaja P. Rosyidi Track quality index as track quality assessment indicator. *Simposium XIX FSTPT, Universitas Islam Indonesia*. 11-13 Oktober 2016.
10. Tzu-Hao Yan, Francesco Corman Assessing and Extending Track Quality Index for Novel Measurement Techniques in Railway Systems. *Transportation Research Record*. 2020. Vol. 2674(8). 24–36. URL: <https://doi.org/10.1177/0361198120923661>.
11. Nur Intan Amira Mat Zahari, Joewono Prasetyo, Yusoff Mamat Maintenance Study of Rail Track Structure for Temporary Track at Electrified Double Track Project (EDTP) Gemas-JB. *Progress in Engineering Application and Technology*. (2022). Vol. 3, No. 2. 774–782. URL: <https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/7929>.
12. Reng-Kui Liu, Peng Xu, Zhuang-Zhi Sun, Ce Zou, and Quan-Xin Sun Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro, Hindawi Publishing Corporation *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015, Article ID 473830. 9 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/473830>.
13. Iman Soleimanmeigouni Predictive Models for Railway Track Geometry Degradation, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, SE- 97187 Luleå, Sweden, 2019.
14. EUROPEAN STANDARD EN 13848-5:2017 E, Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels – Plain line, switches and crossings, August 2017.

15. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. Київ : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. 456 с.

16. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання колії. Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. 46 с.

---

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (067) 678 80 81.

E-mail: potapov\_xiit@ukr.net.

Вітольберг Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730 10 60.

E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Чесак Сергій Сергійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 910 38 67. E-mail: serheychesak@gmail.com.

D. O. Potapov, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Railway Track and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (067) 678 80 81, E-mail: potapov\_xiit@ukr.net.

V.G. Vitolberg, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Railway Track and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730 10 60, E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

S. S. Chesak, postgraduate student of the Department of Railway Track and Transport Facilities of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: +38 (098) 910 38 67, E-mail: serheychesak@gmail.com.

Статтю прийнято 21.03.2024 р.