

Д. О. ПОЛІЩУК (ІОЦ Львівської залізниці, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів)

## ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ КОЛІЙНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРЗАЛІЗНИЦІ

У статті запропоновано метод оцінювання стану колійного господарства Укрзалізниці на підставі багатопараметричного аналізу окремих її елементів з подальшою агрегацією до висновку про якість функціонування системи загалом. Описано програмне забезпечення, розроблене для реалізації запропонованого методу.

*Ключові слова:* залізнична колія, складні динамічні системи, оцінювання, якість

### Формулювання проблеми

Колійне господарство (КГ) – одна з основних підсистем Укрзалізниці (УЗ). До складу УЗ входить понад 30 тис. км залізничних колій [1], стан яких змінюється з часом під дією багатьох зовнішніх та внутрішніх факторів, зокрема кліматичних та геологічних впливів, ремонтів та стабілізації після них і, що найголовніше, – постійних навантажень від поїздів. При цьому всі елементи колії за міцністю, стійкістю та рівнем придатності повинні забезпечувати безпечний рух пасажирських і вантажних поїздів з найбільшими (встановленими для кожної ділянки) швидкостями, а також мати достатній резерв для подальшого збільшення швидкості та вантажонапруженості лінії. Невідповідний стан колії є однією із основних причин залізничних катастроф. На даний час очікують заміни понад 20 % та знаходиться в аварійному стані 16 % залізничних колій [2]. Звідси випливає актуальність проблеми неперервного моніторингу стану КГ УЗ для своєчасного виявлення процесів та ситуацій, які можуть спричинити негативні наслідки.

За своєю структурою та кількістю елементів КГ УЗ є складною системою. Оскільки стан колії змінюється в часі, то воно є динамічною системою. Складна динамічна система (СДС), її підсистеми та елементи можуть мати різний тип та призначення, відрізнятися структурою та способом опису, функціонувати за різними законами [3]. Прикладом реально функціонуючої СДС є УЗ. Серед основних задач оцінювання СДС можна назвати [4] порівняння поточного стану системи з попередніми її станами в сенсі «покращення» чи «погіршення» та визначення тих елементів, які функціонують незадовільно і збій у роботі яких може призвести до виходу з ладу всієї СДС. Ці задачі є актуальними як для УЗ загалом, так і для її підсистем.

Для УЗ пріоритетними напрямками розвитку є введення швидкісного руху поїздів [5], покращення стану колійного і станційного господарств та рухомого складу для перетворення України у потужну транзитну державу [6]. З огляду на ці завдання постає проблема побудови нових залізничних колій та покращення існуючого КГ з мінімізацією економічних витрат. Таке покращення неможливе без попередньої оцінки стану КГ УЗ. Зараз його оцінка проводиться за допомогою як візуальних оглядів з вимірюваннями ручними інструментами, так і з використанням спеціальних пристроїв. Для автоматизованого контролю стану рейок розроблені і використовуються вагони-дефектоскопи та колієвимірювальні вагони [7]. Відомі засоби спостережень за станом земляного полотна можна поділити на дві групи – стаціонарні і рухомі [8]. До стаціонарних належать різні датчики і системи попередження, які встановлюються на об'єкті. Прикладами таких засобів є глибинні ґрунтові репери, інклінометри, тензодатчики, гідрометричні свердловини тощо. До рухомих засобів належать навантажувальні пристрої та георадарні комплекси. У праці [9] описано метод оцінювання залізничної колії, який ґрунтується на даних, одержаних за допомогою колієвимірювальних пристроїв. У цьому методі параметром оцінювання є відхилення реального значення характеристики колії від нормативного, яке встановлене згідно із стандартами побудови колії. Залежно від величини відхилень, кожному кілометру ставиться понятійна оцінка «відмінно», «добре», «задовільно» чи «незадовільно». Висновок про стан залізничної лінії загалом залежить від цих «покілометрових» оцінок та довжини ділянки. Крім того, у [9] метод оцінювання застосовується лише для рейок і не враховує стан інших елементів колії, таких як земляне полотно, шпали, баласт. Також згаданий метод не враховує важливість окремих ді-

© Д. О. Поліщук, 2011

лянок. Наприклад, на лінії Тернопіль-Стрий-Чоп стан ділянки Стрий-Чоп є важливішим, оскільки вона є частиною міжнародного транспортного коридору.

Загалом існуючі програмно-апаратні комплекси [7–9] здійснюють відбір, обробку та візуалізацію даних про поведінку окремих характеристик стану колії, однак вони практично не містять спеціалізованих засобів їх автоматизованого аналізу та оцінювання. Ще одним суттєвим недоліком застосовуваних методик є недостатня чіткість висновків, яка посилюється в процесі узагальнення і не дає можливості спрогнозувати стан колії навіть на найближчу перспективу. Дійсно, оцінка «задовільно» одночасно може означати і «майже добре», і «ледь краще незадовільно».

Тому постає проблема розробки методики комплексного оцінювання стану залізничної колії як СДС за заданими параметрами з використанням даних, одержаних різними способами.

Для дослідження стану КГ УЗ використовуємо метод багаторівневого і багатокритеріального оцінювання якості функціонування СДС [10], який ґрунтується на пошуку «найслабших» елементів системи. Під час застосування цього методу будуємо структурну модель КГ УЗ у вигляді послідовності підсистем до рівня елементарних ділянок. Для кожної з цих ділянок формуємо цілісні набори характеристик, які їх описують. Стосовно кожної характеристики визначаємо сукупність параметрів, за якими проводимо локальне оцінювання ділянки з подальшою агрегацією до висновку про функціонування КГ УЗ загалом. Далі, ґрунтуючись на передісторії попередніх оглядів та одержаних унаслідок цього оцінок, будуємо короткострокові прогнози про стан структурних елементів КГ.

### Структурна модель КГ УЗ

Для побудови моделі КГ пропонується його структуризація згідно з багаторівневим територіально-ієрархічним принципом системи управління УЗ. Згідно з цим принципом КГ УЗ включає в себе, як підсистеми, колійні господарства шести регіональних залізниць, кожна з яких складається з певної кількості підсистем нижчого рівня – дирекцій залізничних перевезень. Загалом налічується 27 дирекцій, які формуються зі 110 дистанцій КГ протяжністю 290–310 км [1]. Дистанції поділяються на відділки (довжиною 20–30 км), які є послідовністю станцій та поєднуючих їх міжстанційних перегонів.

Під час побудови моделі КГ УЗ розрізняємо колії, відштовхуючись від таких ознак:

1) обмежуємо КГ територіями відповідних залізниць, дирекцій, дистанцій та дрібніших структур системи управління УЗ;

2) у межах виділеної територіальної частини КГ підсистему поділяємо спочатку за значенням (міждержавна, загальноукраїнська, регіональна, місцева), а потім за категорією колії [11].

Розіб'ємо довільний перегін  $D$  на послідовність ділянок  $\{D_n\}_{n=1}^N$  з довжинами  $\{S_n\}_{n=1}^N$  відповідно. Ці ділянки відрізняються своїми просторовими (горизонтальна чи похила, пряма чи крива), конструктивними (одно- чи двоколійна, форма профілю полотна, наявність чи відсутність електрифікації, стикові чи безстикові рейки тощо), геологічними (тип ґрунту, рельєф місцевості) та іншими (можливість зсувів, підмивів) особливостями, розділяються штучними спорудами різних типів, переїздами, стрілочними переводами тощо. Вважаємо, що довжина довільної ділянки не перевищує заданого значення  $S_{\max} = 1$  км. Отже, кожна з таких ділянок, які надалі називатимемо елементарними, повинна володіти властивістю однорідності в довільній точці свого пролягання. Таке розбиття дає можливість застосувати до кожної ділянки чітко визначений набір характеристик, критеріїв та параметрів оцінки з відповідними областями допустимих значень. Пропонований спосіб поділу на елементарні ділянки на відміну від прийнятого у [9] кілометрового пояснюється тим, що нормативні значення характеристик, наприклад, просторового розміщення рейок для кривої ділянки колії є незадовільними для прямої горизонтальної і навпаки. Тому поєднання таких ділянок в одну може внести певну неоднозначність як у результат оцінки, так і у відповідні рекомендації з усунення недоліків.

Залежно від сформованого переліку елементарних ділянок та параметрів їхньої оцінки будується модель агрегованого оцінювання.

Залізнична колія складається з таких компонент [12, 13], як нижня будова колії (НБК) та верхня будова колії (ВБК). Складовими НБК є земляне полотно (насипи, виїмки, півнасипи тощо), водовідвідні канали, резерви (водовідводи вздовж насипу, з яких був взятий ґрунт) та штучні споруди (мости, тунелі, труби, підпірні стіни тощо). До ВБК, як складові, належать баластний шар, шпали, рейки, кріплення, протиуголи, стрілочні переводи, мостові та перевідні бруси. Для кожної з цих складових формуємо набір характеристик, за якими буде проводитись оцінювання.

Розглянемо елементарну ділянку колії  $D_n$  довжиною  $S_n$ . Вважаємо, що ця ділянка є горизонтальною одноколіійною прямою зі стиковою колією без електрообладнання, шпали дерев'яні, земляне полотно є насипом, а довколишній рельєф місцевості є рівнинним. У нашій моделі виділяємо з НБК такі складові, як насип земляного полотна, канава та резерв, з ВБК – рейки, шпали та баласт. Далі розглянемо набір характеристик, які описують цю ділянку.

## 1. Для ВБК.

### 1.1. Для рейок.

- 1.1.1. Міжрейкова відстань.
- 1.1.2. Стики між рейками з лівої сторони.
- 1.1.3. Стики між рейками з правої сторони.
- 1.1.4. Співвідношення між висотою рейкових ниток.
- 1.1.5. Нахил рейок з лівої сторони стосовно шпал.
- 1.1.6. Нахил рейок з правої сторони стосовно шпал.
- 1.1.7. Взаємне розміщення стиків між рейками з правої та лівої сторони.
- 1.1.8. Просідання рейки з лівої сторони під час руху поїзда з максимальними для цієї ділянки швидкістю і масою.
- 1.1.9. Просідання рейки з правої сторони під час руху поїзда з максимальними для цієї ділянки швидкістю і масою.
- 1.1.10. Дефект рейки з лівої сторони.
- 1.1.11. Дефект рейки з правої сторони.

### 1.2. Для шпал.

- 1.2.1. Відстань між стиковими шпалами.
- 1.2.2. Відстань між шпалами.

### 1.3. Для баласту.

- 1.3.1. Укіс баластної призми з лівої сторони.
- 1.3.2. Укіс баластної призми з правої сторони.
- 1.3.3. Укіс піщаної подушки з лівої сторони.
- 1.3.4. Укіс піщаної подушки з правої сторони.
- 1.3.5. Відстань від краю шпали до початку укусу баластної призми з лівої сторони.
- 1.3.6. Відстань від краю шпали до початку укусу баластної призми з правої сторони.
- 1.3.7. Товщина піщаної подушки.
- 1.3.8. Товщина баластного шару.
- 1.3.9. Відстань від верхньої межі баласту до верхньої грані шпал.
- 1.3.10. Засмічення баласту фракціями меншими, ніж 0,1 мм.
- 1.3.11. Засмічення баласту фракціями від 0,1 мм до 25 мм.
- 1.3.12. Кількість шпал (у відсотках) на 1 км колії, де баласт втратив стійкість.
- 1.3.13. Ширина баластної призми по верхній межі.

## 2. Для НБК.

## 2.1. Для земляного полотна.

- 2.1.1. Ширина основного майданчика земляного полотна.
- 2.1.2. Крутизна укосів насипу з лівої сторони.
- 2.1.3. Крутизна укосів насипу з правої сторони.
- 2.1.4. Ширина берми (смуги землі від підшови укусу до водовідвідної канави).
- 2.1.5. Нахил берми.
- 2.1.6. Величина морозного здуття земляного полотна.
- 2.1.7. Величина пружних осадів земляного полотна по осі колії.
- 2.1.8. Відхилення висотних позначок осі земляного полотна.
- 2.1.9. Відхилення бровки земляного полотна від проектного розташування осі.
- 2.1.10. Відхилення бровки укусу насипу від її проектного розташування.
- 2.1.11. Дефекти у земляному полотні.

## 2.2. Для водовідвідної канави.

- 2.2.1. Глибина водовідвідної канави.
- 2.2.2. Ширина водовідвідної канави.
- 2.2.3. Повздовжній нахил водовідвідної канави.

## 2.3. Для резерву.

- 2.3.1. Поперечний нахил резерву.
- 2.3.2. Повздовжній нахил резерву.
- 2.3.3. Крутизна укосів резерву з лівої сторони.
- 2.3.4. Крутизна укосів резерву з правої сторони.

Загалом кількість характеристик для визначеного (найпростішого) типу ділянки дорівнює 44. Для інших випадків (двоколіійна ділянка, ділянка із електрообладнанням тощо) кількість характеристик зростає. Отже, щоб оцінити стан усього КГ УЗ у разі встановленого значення  $S_{\max}=1$  км, враховуючи його загальну протяжність, потрібно зробити щонайменше 1320000 локальних оцінювань за заданими параметрами.

## Локальне оцінювання структурних елементів КГ УЗ

Нехай  $R_n \leq 40$  – кількість пар рейок на ділянці колії  $D_n$  довжиною  $S_n \leq S_{\max}$ . Тут  $R_n = S_n / d$ , де  $d = 25$  м – стандартна довжина рейки. Позначимо  $s_r$  відрізок колії, який на ділянці  $D_n$  відповідає парі рейок з порядковим номером  $r$ , до того ж  $r = \overline{1, R_n}$ .

Оцінка поведінки обраної характеристики проводиться на підставі результатів огляду та контролю стану колії. Зрозуміло, що кількість одержаних унаслідок цього даних залежить від способу їх збору і типу характеристики. Наприклад, така характеристика як співвідношення між висотою рейкових ниток (1.1.4) є непер-

рвною функцією. Проте кількість даних для цієї характеристики залежить від моделі колієвимірювального вагону. Тоді ж як кількість даних про взаємне розміщення стиків рейок (характеристика 1.1.7) на ділянці  $D_n$  дорівнює  $R_n - 1$ . Тобто поведінка будь-якої характеристики визначається на множині точок. Вважаємо, що для конкретної характеристики на відрізку колії  $s_r$ ,  $r = \overline{1, R_n}$ , ми одержуємо  $m$  даних, де  $m = \overline{1, M}$ .

Позначимо  $\{f_{n,j}^{k,i}(s_r^m)\}_{m=1}^M$  – послідовність одержаних унаслідок огляду та контролю значень заданої характеристики колії на відрізках  $s_r$ ,  $r = \overline{1, R_n}$ . Тут і надалі  $n = \overline{1, N}$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $i = \overline{1, I}$  – номери елементарних ділянок, компонент, складових і характеристик відповідно.

У процесі дослідження нами було виділено чотири основні типи поведінки наведених вище характеристик. Кожний із них, окрім способу відбору даних, відрізняється виглядом області допустимих значень, способом формування її підобластей, які визначають поведінку характеристики; вибором функціоналів, за якими проводиться оцінювання у неперервній шкалі [11], та способом співставлення значенням функціоналів оцінок стану колії в уточненій бальній шкалі.

Для спрощення викладу методу оцінювання поведінки характеристики  $f_{n,j}^{k,i}(s_r^m)$  надалі опустимо індекси  $n, k, j, i, r, m$  та повернемося до них на етапі агрегованого оцінювання. Інтерполюємо дану характеристику кусково-лінійними елементами та позначимо її  $f(s)$ .

Перший тип поведінки властивий характеристикам 1.1.1–1.1.7, 1.2.1, 1.2.2, 1.3.1–1.3.6, 1.3.13, 2.1.1–2.1.3, 2.2.3, 2.3.1–2.3.4, які вирізняються тим, що для них область допустимих значень має вигляд

$$G = \{f(s) : f_{\min} \leq f(s) \leq f_{\max}, s \in [0, S_n]\},$$

де  $f_{\min}$  і  $f_{\max}$  – максимально допустимі відхилення характеристики  $f(s)$  від її нормативного значення  $f_{\text{norm}}$ , які встановлюються згідно із стандартами побудови залізничної колії. Наприклад, для міжрейкової відстані на горизонтальній прямій  $f_{\text{norm}} = 1520$  мм,  $f_{\min} = 1516$  мм і  $f_{\max} = 1528$  мм [12].

Визначимо для  $G$  підобласті поведінки характеристики  $f(s)$ , які відповідають різним значенням бальної шкали оцінок. Вважаємо, що

поведінка характеристики є «відмінною», якщо  $f(s) = f_{\text{norm}}$  (див. відрізки  $s_1, s_2$  на рис. 1).

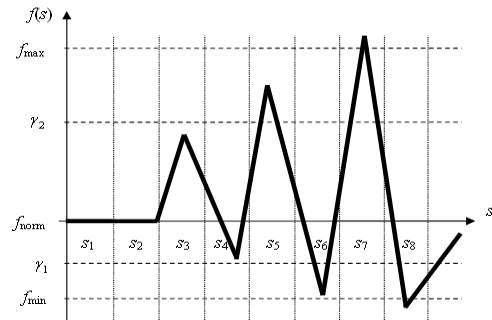


Рис. 1. Перший тип поведінки характеристик

Підобласть  $[\gamma_1, f_{\text{norm}}) \cup (f_{\text{norm}}, \gamma_2]$  відповідає поведінці «добре» характеристики  $f(s)$  (див. відрізки  $s_3, s_4$  на рис.1). Значення величин  $\gamma_1 \in (f_{\min}, f_{\text{norm}})$  і  $\gamma_2 \in (f_{\text{norm}}, f_{\max})$  вказують експерти із експлуатації залізничного транспорту. Підобласть  $[f_{\min}, \gamma_1) \cup (\gamma_2, f_{\max}]$  відповідає поведінці «задовільно» (див. відрізки  $s_5, s_6$  на рис.1). Якщо значення характеристики  $f(s)$  перевищує величину  $f_{\max}$  або менше за  $f_{\min}$ , то її поведінку вважаємо «незадовільною» (див. відрізки  $s_7, s_8$  на рис. 1). Зрозуміло, що поведінка характеристики  $f(s)$  визначається за її найбільшим відхиленням від нормативу, тобто значенням  $c_0 = \|f(s)\|_{C_0[0, S_n]} = \max_{s \in [0, S_n]} |f(s)|$ .

Оскільки максимально допустимі відхилення  $f_{\min}$  та  $f_{\max}$  не обов'язково дорівнюють одне одному, то величина  $\gamma_1$  не завжди дорівнює  $\gamma_2$ . Тому однакове за модулем відхилення характеристики  $f(s)$  від  $f_{\text{norm}}$  може потрапити у підобласть як «хорошої», так і «незадовільної» оцінки. Приклад такої ситуації наведено на рис. 1, де  $f(s)$  на відрізок  $s_3$  потрапляє у підобласть оцінки «добре», а на відрізок  $s_8$  – у підобласть оцінки «незадовільно», хоча  $\left| \max_{s \in s_3} f(s) - f_{\text{norm}} \right| = \left| \min_{s \in s_8} f(s) - f_{\text{norm}} \right|$ . Унаслідок цього виникає потреба співвіднести області оцінювання обраної характеристики з відхиленням її значень від нормативу. Для цього введемо допоміжну функцію

$$\alpha(s) = \begin{cases} (f(s) - f_{\text{norm}}) / f^+, & \text{якщо } f(s) > f_{\text{norm}} \\ (f(s) - f_{\text{norm}}) / f^-, & \text{якщо } f(s) < f_{\text{norm}}, \end{cases}$$

де  $f^+ = f_{\max} - f_{\text{norm}}$ ,  $f^- = f_{\text{norm}} - f_{\min}$ ,  $\alpha(s) \in [-1, 1]$ ,  $s \in [0, S_n]$ . Отже, відношення відхи-

лення характеристики від її нормативного значення до різниці між її максимально допустимим значенням та нормативом стає пропорційним. Позначимо  $\gamma = \min\{(f_{\text{norm}} - \gamma_1)/f^-, (\gamma_2 - f_{\text{norm}})/f^+\}$ . Відзначимо також, що введення величини  $\gamma$  робить одержані висновки жорсткішими.

Для оцінювання поведінки досліджуваної характеристики будемо використовувати два підходи. Перший із них формує уточнену бальну оцінку  $E_{C_0}$  на підставі аналізу величини максимальних збурень  $f(s)$  на ділянці  $D_n$ , а саме:

- $E_{C_0} = 2$ , якщо  $1 < \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]}$ ;
- $E_{C_0} = 3 + (1 - \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]}) / (1 - \gamma)$ , якщо  $\gamma < \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]} \leq 1$ ;
- $E_{C_0} = 4 + (\gamma - \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]}) / \gamma$ , якщо  $0 < \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]} \leq \gamma$ ;
- $E_{C_0} = 5$ , якщо  $\|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]} \equiv 0$ .

Точки, в яких досліджувана характеристика виходить за межі допустимої області, фіксуються та передаються відповідним підрозділам КГ УЗ для термінового усунення недоліків.

Другий підхід формує уточнену бальну оцінку  $E_{L_0}$  на підставі масовості збурень  $f(s)$  на ділянці  $D_n$ , а саме:

- $E_{L_0} = 2$ , якщо  $1 < \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]}$ ;
- $E_{L_0} = 3 + ((1 - \gamma)\sqrt{S_n} - \|\alpha(s)\|_{L_2[0, S_n]}) / ((1 - \gamma)\sqrt{S_n})$ , якщо  $\gamma < \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]} \leq 1$ ;
- $E_{L_0} = 4 + (\gamma\sqrt{S_n} - \|\alpha(s)\|_{L_2[0, S_n]}) / \gamma\sqrt{S_n}$ , якщо  $0 < \|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]} \leq \gamma$ ;
- $E_{L_0} = 5$ , якщо  $\|\alpha(s)\|_{C_0[0, S_n]} \equiv 0$ .

$$\text{Як відомо, } \|f(s)\|_{L_2[0, S_n]} = \left[ \int_0^{S_n} (f(s))^2 ds \right]^{1/2}.$$

Якщо функція  $f(s)$  є константою зі значенням  $1 - \gamma$  на проміжку  $[0, S_n]$ , тоді  $\|f(s)\|_{L_2[0, S_n]} = (1 - \gamma)\sqrt{S_n}$ .

Наприклад, якщо унаслідок оцінювання одержана пара оцінок  $E_{C_0} = 3,05$ ;  $E_{L_0} = 3,94$ , то число 3,05 означає, що максимальне відхилення характеристики  $f(s)$  від її нормативного значення вздовж ділянки  $D_n$  є близьким до критичної

межі. Але число 3,94 означає, що кількість цих відхилень є невеликою. Такі недоліки можна усунути за допомогою незначного локального ремонту. У той же час пара оцінок  $E_{C_0} = 3,01$ ;  $E_{L_0} = 3,02$  свідчить, що стан ділянки з огляду на досліджувану характеристику близький до критичного не лише у кількох точках, а вздовж усєї ділянки, і потребує серйозного ремонту.

Аналогічно будуються уточнені оцінки  $E_{C_1}$ ,  $E_{L_1}$  для першої похідної  $f(s)$ , які дають змогу проаналізувати динаміку зміни стану колії вздовж елементарної ділянки. Осцилююча динаміка зазвичай свідчить про зниження комфортності та безпеки руху поїздів, особливо під час збільшення їхньої швидкості.

Тут і надалі, якщо хоча б одна з вищезазначених оцінок є «незадовільною», то узагальнену оцінку заданої характеристики (складової, компоненти, елементарної ділянки) теж вважаємо «незадовільною». В іншому випадку узагальнену оцінку  $E$  поведінки характеристики  $f(s)$  на ділянці  $D_n$  визначатимемо за формулою

$$E = (\rho_{C_0} E_{C_0} + \rho_{C_1} E_{C_1} + \rho_{L_0} E_{L_0} + \rho_{L_1} E_{L_1}) / (\rho_{C_0} + \rho_{C_1} + \rho_{L_0} + \rho_{L_1}),$$

де  $\rho_{C_0}$ ,  $\rho_{C_1}$ ,  $\rho_{L_0}$ ,  $\rho_{L_1}$  – вагові коефіцієнти, які набувають значень з відрізка  $[0, 1]$ . Ці коефіцієнти визначають пріоритетність параметрів оцінки і встановлюються внаслідок опитування експертів та фахівців із оцінювання транспортних засобів.

Другий тип поведінки властивий характеристикам 1.1.8, 1.1.9, 1.3.10–1.3.12, 2.1.6–2.1.10, які вирізняються тим, що для них область допустимих значень має вигляд

$$G = \{f(s) : f_{\text{norm}} \leq f(s) \leq f_{\text{max}}, s \in [0, S_n]\}.$$

Як і раніше, вважаємо, що поведінка характеристики  $f(s)$  є «відмінною», якщо  $f(s) = f_{\text{norm}}$  (див. відрізки  $s_1$ ,  $s_2$  на рис. 2). Підобласть  $(f_{\text{norm}}, \gamma]$  відповідає поведінці «добре» характеристики  $f(s)$  (див. відрізки  $s_3$ – $s_5$  на рис. 2). Значення  $\gamma \in (f_{\text{norm}}, f_{\text{max}}]$  у даному разі встановлюють також експерти. Підобласть  $(\gamma, f_{\text{max}}]$  відповідає поведінці «задовільно» (див. відрізки  $s_6$ ,  $s_7$  на рис. 2). Якщо значення характеристики  $f(s)$  перевищує величину  $f_{\text{max}}$ , то її поведінка вважається «незадовільною» (див. відрізок  $s_8$  на рис. 2).

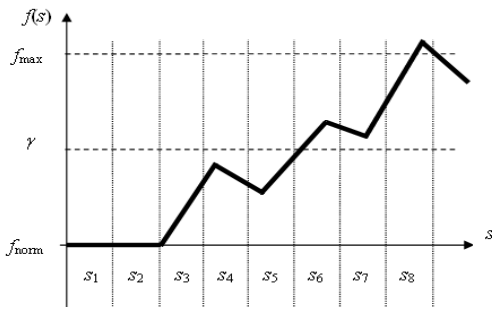


Рис. 2. Другий тип поведінки характеристик

Як і раніше, для оцінювання поведінки досліджуваної характеристики будемо використовувати результати аналізу величини максимальних збурень  $f(s)$  на ділянці  $D_n$ , а саме:

- $E_{C_0}=2$ , якщо  $f_{\max} < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]}$ ;
- $E_{C_0}=3+(f_{\max} - \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]}) / (f_{\max} - \gamma)$ ,  
якщо  $\gamma < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \leq f_{\max}$ ;
- $E_{C_0}=4+(\gamma - \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]}) / \gamma$ ,  
якщо  $f_{\text{norm}} < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \leq \gamma$ ;
- $E_{C_0}=5$ , якщо  $\|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \equiv f_{\text{norm}}$

та результати аналізу масовості збурень  $f(s)$  на ділянці  $D_n$ , а саме:

- $E_{L_0}=2$ , якщо  $f_{\max} < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]}$ ;
- $E_{L_0}=3+((f_{\max} - \gamma) \sqrt{S_n} - \|f(s) - \gamma\|_{L_2[0,S_n]}) / ((f_{\max} - \gamma) \sqrt{S_n})$ , якщо  $\gamma < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \leq f_{\max}$ ;
- $E_{L_0}=4+(\gamma \sqrt{S_n} - \|f(s)\|_{L_2[0,S_n]}) / \gamma \sqrt{S_n}$ , якщо  $f_{\text{norm}} < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \leq \gamma$ ;
- $E_{L_0}=5$ , якщо  $\|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \equiv f_{\text{norm}}$ .

Точки, в яких досліджувана характеристика виходить за межі допустимої області, фіксуються та передаються відповідним підрозділам КГ УЗ для термінового усунення недоліків.

Аналогічно будуються уточнені оцінки  $E_{C_1}$ ,  $E_{L_1}$  для першої похідної  $f(s)$  та узагальнена оцінка  $E$  поведінки довільної характеристики другого типу на ділянці  $D_n$ .

Третій тип поведінки властивий характеристикам 1.3.7, 1.3.8, 2.1.4, 2.1.5, 2.2.1, 2.2.2, які вирізняються тим, що для них область допустимих значень має вигляд

$$G = \{f(s) : f_{\text{norm}} \leq f(s), s \in [0, S_n]\}.$$

Поведінка характеристики  $f(s)$  є «відмінною», якщо  $f(s) \equiv f_{\text{norm}}$  (див. відрізки  $s_1, s_2,$

$s_8$  на рис. 3). Підобласть  $(f_{\text{norm}}, \gamma]$  відповідає поведінці «добре» характеристики  $f(s)$  (див. відрізки  $s_3, s_5, s_7$  на рис. 3). Підобласть  $(\gamma, \infty)$  відповідає поведінці «задовільно» (див. відрізок  $s_6$  на рис. 3). Якщо значення характеристики  $f(s)$  менше за  $f_{\text{norm}}$ , то її поведінка вважається «незадовільною» (див. відрізок  $s_4$  на рис. 3).

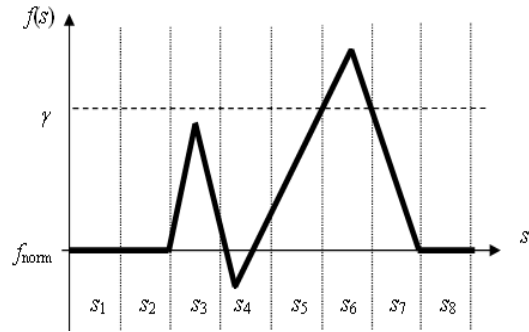


Рис. 3. Третій тип поведінки характеристик

У випадку третьої групи характеристик недоцільно розглядати оцінки  $E_{L_0}$ ,  $E_{C_1}$  і  $E_{L_1}$ , оскільки вони будуть малоінформативними. Тому оцінювання проводимемо лише за параметром  $C_0$ :

- $E_{C_0}=2$ , якщо  $\min_{s \in [0, S_n]} f(s) < f_{\text{norm}}$ ;
- $E_{C_0}=3$ , якщо  $\gamma < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]}$ ;
- $E_{C_0}=4$ , якщо  $f_{\text{norm}} < \|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \leq \gamma$ ;
- $E_{C_0}=5$ , якщо  $\|f(s)\|_{C_0[0,S_n]} \equiv f_{\text{norm}}$ .

Узагальнена оцінка  $E$  поведінки характеристики  $f(s)$  на відрізку  $[0, S_n]$  дорівнює оцінці  $E_{C_0}$ .

Четвертий тип поведінки властивий характеристикам 1.1.10, 1.1.11, 1.3.9, 2.1.11, які описують наявність дефектів різного типу. Вважаємо, що значення характеристики  $f(s) = f_{\text{norm}} \equiv 0$ , якщо дефекти відсутні і  $f(s) = 1$ , якщо виявлено дефект. Тоді вважаємо оцінку  $E$  характеристики  $f(s)$  «незадовільною», якщо  $f(s) \neq f_{\text{norm}}$ , (див. відрізок  $s_5$  на рис. 4). В інших випадках вважаємо оцінку  $E$  характеристики  $f(s)$  «відмінною».

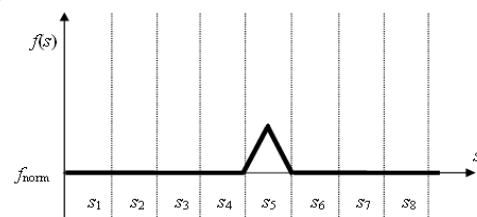


Рис. 4. Четвертий тип поведінки характеристик

## Короткострокове прогнозування оцінок стану колії

Знаючи передісторію попередніх оглядів та одержаних у результаті цього оцінок, ми можемо спрогнозувати стан колії на ділянці  $D_n$ , екстраполюючи значення  $E_{C_0,n,j}^{k,i}$ ,  $E_{L_0,n,j}^{k,i}$ ,  $E_{C_1,n,j}^{k,i}$  та  $E_{L_1,n,j}^{k,i}$  (тобто відповідно значення  $E_{C_0}$ ,  $E_{L_0}$ ,  $E_{C_1}$  та  $E_{L_1}$ , одержані під час оцінювання  $i$ -ї характеристики для  $j$ -ї складової  $k$ -ї компоненти на  $n$ -ій ділянці) до моменту наступного планового огляду, або визначити момент часу, коли понятійна оцінка погіршиться на одиницю при тому ж режимі експлуатації та за відсутності факторів, які можуть різко погіршити цей стан. Нехай  $\{t_l\}_{l=1}^L$  – послідовність моментів часу, під час яких проводився огляд та здійснювались контроль і оцінка стану елементарної ділянки. Побудуємо функцію

$$P_{n,j_0}^{k,i}(t) = \sum_{l=1}^L a_l \varphi_l(t),$$

де  $\{\varphi_l(t)\}_{l=1}^L$ ,  $L \geq 2$  – система лінійно незалежних функцій, наприклад, алгебраїчних поліномів [14],  $\{a_l\}_{l=1}^L$  – невідомі коефіцієнти, які визначаємо з умов

$$P_{n,j_0}^{k,i}(t_l) = E_{C_0,n,j}^{k,i} \Big|_{t=t_l}, \quad l = \overline{1, L}.$$

Тоді прогнозована оцінка в момент наступного планового огляду  $t_{L+1} = t_L + \tau$ ,  $\tau \leq \max_{1 \leq l \leq L-1} (t_{l+1} - t_l)$  визначається співвідношенням

$$E_{C_0,n,j}^{k,i} \Big|_{t=t_{L+1}} \equiv P_{n,j_0}^{k,i}(t_{L+1}) = \sum_{l=1}^L a_l \varphi_l(t_{L+1}).$$

Оскільки, виходячи з поведінки послідовності  $\{E_{C_0,n,j}^{k,i} \Big|_{t=t_l}\}_{l=1}^L$ ,  $P_{n,j_0}^{k,i}(t)$  є монотонно спадаючою функцією, час наступного огляду також можна визначити з умови

$$P_{n,j_0}^{k,i}(t) \leq \tilde{E}_{C_0,n,j}^{k,i},$$

де  $\tilde{E}_{C_0,n,j}^{k,i}$  – значення  $E_{C_0,n,j}^{k,i}$ , яке відповідає понятійній оцінці на одиницю меншій за встановлену на момент останнього огляду або контролю.

Аналогічно можна будувати короткострокові прогнози для  $E_{L_0,n,j}^{k,i}$ ,  $E_{C_1,n,j}^{k,i}$  та  $E_{L_1,n,j}^{k,i}$ , які також можна використовувати для оцінювання стану колії. Отже, за стабільної вантажонапру-

женості ділянки та швидкості руху поїздів по ній короткострокові прогнози покажуть, які елементи колії на цій ділянці найшвидше потребуватимуть ремонту, та дозволять оптимізувати графік ремонтних робіт.

## Агреговане оцінювання елементів КГ УЗ

Нехай  $E_{n,j}^{k,i}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $k = \overline{1, K}$  – сукупність оцінок характеристик визначеної складової обраної компоненти заданої ділянки  $D_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Оцінку визначеної складової обраної компоненти будемо так:

$$E_{n,j}^k = \sum_{i=1}^I (\rho_{n,j}^{k,i} E_{n,j}^{k,i}) / \sum_{i=1}^I \rho_{n,j}^{k,i},$$

де  $\rho_{n,j}^{k,i}$  – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність характеристик, за якими проводиться оцінювання. Тут  $\rho_{n,j}^{k,i} \in [0, 1]$ . Одержане значення дає можливість визначити складові, стан яких в оцінюваній компоненті є найгіршим.

Одержавши сукупність оцінок  $E_{n,j}^k$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $n = \overline{1, N}$  складової обраної компоненти заданої елементарної ділянки, будемо оцінку обраної компоненти:

$$E_n^k = \sum_{j=1}^J (\rho_{n,j}^k E_{n,j}^k) / \sum_{j=1}^J \rho_{n,j}^k,$$

де  $\rho_{n,j}^k$  – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність складових, за якими проводиться оцінювання. Тут  $\rho_{n,j}^k \in [0, 1]$ . Одержане значення дає можливість визначити компоненти, стан яких в оцінюваній елементарній ділянці є найгіршим.

Оцінка стану заданої елементарної ділянки будується за набором оцінок його компонент, а саме:

$$E_n = \sum_{k=1}^K (\rho_n^k E_n^k) / \sum_{k=1}^K \rho_n^k,$$

де  $\rho_n^k$  – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність компонент, за якими проводиться оцінювання. Тут  $\rho_n^k \in [0, 1]$ .

Оцінка стану перегону загалом ( $E_D$ ) формується за набором оцінок елементарних ділянок, з яких він складається:

$$E_D = \sum_{n=1}^N (\rho_n E_n) / \sum_{n=1}^N \rho_n,$$

де  $\rho_n$  – вагові коефіцієнти, що визначають прі-

оритетність елементарних ділянок, за якими проводиться оцінювання. Тут  $\rho_n \in [0, 1]$ . Пріоритет елементарної ділянки залежить, зокрема, від значення колії, якій належить ця ділянка. Усі колії поділяються на міждержавні, загальнодержавні, регіональні, місцеві та за категорією: швидкісні, особливо вантажонапружені, магістральні лінії (4-х категорій) [11] тощо. Наступними кроками узагальнення є оцінка КГ згідно з територіально-ієрархічним принципом системи управління УЗ.

### Практична реалізація

Для реалізації запропонованого методу оцінювання структурних елементів КГ УЗ розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє проводити оцінювання ділянки та надає користувачеві його результати з подальшою можливістю деталізації до рівня характеристики. Межі перегонів та елементарних ділянок встановлюємо згідно з відстанню від них до вузлових станцій. Розглянемо перегін, який починається від 1175 м і закінчується на 2575 м на одному з напрямків, що виходять з вузлової станції VS. Межі перегонів кратні 25, оскільки одиницею вимірювання ми вважаємо рейку довжиною 25 м. Нехай цей перегін складається з двох елементарних ділянок, розділених переїздом. Ці ділянки є горизонтальними одноколійними прямими з ланковою колією без електрообладнання, земляне полотно є насипом, довколишній рельєф місцевості є рівнинним, вантажонапруженість цих ділянок становить 25 млн т·км/км (колія має II категорію) [12].

На рис. 5 зображено вікно програми з результатом оцінювання перегону загалом та оцінки елементарних ділянок, довжини яких вказано у метрах.

Одержані результати оцінювання передаються відповідним службам УЗ для усунення виявлених недоліків. Ці результати дозволяють визначити, які ділянки колії потребують термінового (позапланового) ремонту та стан яких ділянок вимагає проведення першочергових ремонтних робіт.

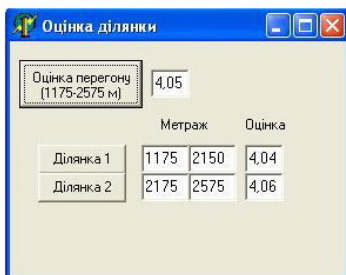


Рис. 5. Оцінка перегону

Обравши ділянку, користувач одержує результати оцінювання складових компонент (рис. 6).



Рис. 6. Оцінка складових

Обравши складову, користувач переходить до оцінювання її характеристик. Ці результати можуть бути відображені як у графічному (рис. 7), так і у табличному (рис. 8) вигляді. У випадку табличної візуалізації користувач має можливість переглянути, у яких саме точках результати оцінювання є «задовільними» чи «незадовільними».

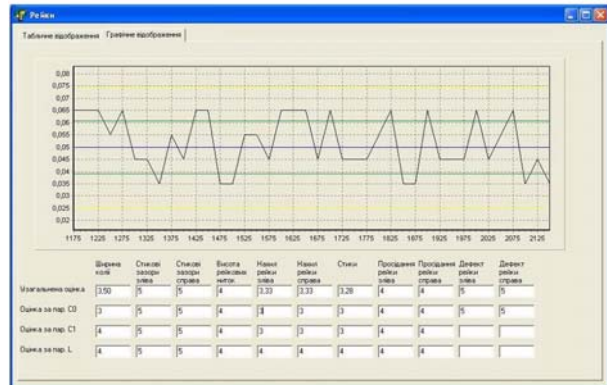


Рис. 7. Графічна візуалізація результатів оцінювання

| Метраж             | Ширина колії | Станок зазорів зліва | Станок зазорів справа | Висота рейкового нічог | Масштаб рейки зліва | Масштаб рейки справа | Станок | Прокладання рейки зліва | Прокладання рейки справа | Діаметр рейки зліва | Діаметр рейки справа |
|--------------------|--------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|----------------------|--------|-------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| 1175-1521          | 13           | 13                   | -2                    | 0,085                  | 0,025               | -4                   | 1      | 0                       | 0                        | 0                   | 0                    |
| 1521-1922          | 13           | 13                   | -2                    | 0,085                  | 0,045               | -1                   | 0      | 1                       | 0                        | 0                   | 0                    |
| 1922-1922          | 13           | 13                   | 0                     | 0,085                  | 0,095               | 6                    | 0      | 1                       | 0                        | 0                   | 0                    |
| 1922-1921          | 13           | 13                   | 1                     | 0,085                  | 0,045               | 6                    | 1      | 0                       | 0                        | 0                   | 0                    |
| 1921-1225          | 13           | 13                   | 1                     | 0,085                  | 0,045               | 1                    | 0      | 1                       | 0                        | 0                   | 0                    |
| Узагальнена оцінка | 1,50         | 5                    | 5                     | 4                      | 3,33                | 3,33                 | 3,28   | 4                       | 4                        | 5                   | 5                    |
| Оцінка за пар. С0  | 3            | 5                    | 5                     | 4                      | 3                   | 3                    | 3      | 4                       | 4                        | 5                   | 5                    |
| Оцінка за пар. С1  | 4            | 5                    | 5                     | 4                      | 3                   | 3                    | 3      | 4                       | 4                        | 4                   | 5                    |
| Оцінка за пар. L   | 4            | 5                    | 5                     | 4                      | 4                   | 4                    | 4      | 4                       | 4                        | 4                   | 5                    |

Рис. 8. Таблична візуалізація результатів оцінювання



## Висновки

У роботі запропоновано метод оцінювання стану КГ УЗ, як складної динамічної системи. З цією метою побудовано модель КГ УЗ та формалізовано процедуру поділу КГ УЗ на підсистеми нижчого рівня аж до одержання елементарних ділянок. Для кожної елементарної ділянки сформовано набори складових, компонент, характеристик та параметрів оцінки, які повністю її описують. На підставі набору локальних оцінок характеристик колії побудована послідовність агрегованих оцінок до одержання загального висновку про стан перегону. Для практичної реалізації запропонованого методу оцінювання розроблено програмне забезпечення. Одержані результати оцінювання можуть бути використані для оперативного пошуку та першочергового усунення виявлених недоліків у роботі КГ УЗ.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Офіційний сайт Укрзалізниці [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.uz.gov.ua>.
2. Надзвичайні ситуації та цивільний захист населення [Текст] / за ред. С. П. Сонько. – Львів : Магнолія, 2009. – 232 с.
3. Бусленко, Н. П. Лекции по теории сложных систем [Текст]: учеб. пособие / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. – М. : Советское радио, 1973. – 441 с.
4. Полищук, А. Д. Оптимизация оценки качества функционирования сложных динамических систем [Текст] / А. Д. Полищук // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 4. – С. 39-44.

Д. О. ПОЛИЩУК

## ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПУТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА УКРЗАЛИЗНЫЦИ

В статье предложен метод оценивания состояния путевого хозяйства Укрзалізниці на основании многопараметрического анализа отдельных её элементов с последующей агрегацией к выводу о качестве функционирования системы в целом. Описано программное обеспечение, разработанное для реализации предложенного метода.

*Ключевые слова:* железнодорожный путь, сложные динамические системы, оценивание, качество

D. O. POLISHCHUK

## EVALUATION OF UKRAINIAN RAILWAY EQUIPMENT CONDITION

In this paper the method for evaluation of Ukrainian railway equipment condition is proposed. The method is based on multiparametric analysis of system's elements with further aggregation to conclusion of system's functional quality. Software, developed for realisation of the proposed method, is described.

*Keywords:* railway track, complex dynamic systems, evaluation, quality

5. Курган, М. Б. Впровадження швидкісного руху поїздів в Україні [Текст] / М. Б. Курган, І. П. Корженевич // Заліз. трансп. України. – 2005. – № 2. – С. 45-51.

6. Закон України Про Комплексну програму утвердження України як транзитної держави у 2002-2010 роках [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=3022-14>

7. Офіційний сайт «Авіоніка» [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.avionika-ndt.com/>

8. Інформаційно-аналітичний огляд «Евразия Вести» [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eav.ru/pubs.php?number=2008-02>

9. Железнодорожный транспорт [Текст] / под ред. Н. С. Конарева. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2003. – 1038 с.

10. Полищук, Д. О. Порівняння методів оцінювання складних систем [Текст] / Д. О. Полищук, О. Д. Полищук, М. С. Яджак // Відбір і обробка інформації. – 2010. – № 32 (108). – С. 110-119.

11. Общий курс железных дорог [Текст] : учеб. пособие / под ред. Ю. И. Ефименко. – М. : Academia, 2005. – 256 с.

12. Железнодорожный путь [Текст] / под ред. Т. Г. Яковлевой. – М. : Транспорт, 1999. – 405 с.

13. Железные дороги. Общий курс [Текст] : учеб. пособие / под ред. М. М. Уздина. – М. : Транспорт, 1991. – 295 с.

14. Калиткин, Н. Н. Численные методы [Текст] : учеб. пособие / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

Надійшла до редколегії 31.10.2011.

Прийнята до друку 08.11.2011.