

## **КОМПЛЕКСНЕ ДЕТЕРМІНОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ. ЧАСТИНА II. ЛОКАЛЬНЕ ТА ПРОГНОСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ**

**Д.О. ПОЛІЩУК., О.Д. ПОЛІЩУК, М.С. ЯДЖАК**

Запропоновано методику комплексного детермінованого оцінювання складних систем з ієрархічно-мережевою структурою, складовими якої є методи локального, прогностичного, агрегованого та інтерактивного аналізу стану, якості функціонування та взаємодії об'єктів системи всіх рівнів ієрархії. Описано методи локального та прогностичного оцінювання поведінки характеристик елементів системи, які є основою для подальшої побудови узагальнених висновків щодо її стану та якості функціонування. Запропонована уточнена бальна шкала оцінок дозволяє не лише визначити якість елемента, але й частково встановити причини виявлених недоліків. Прогностичний аналіз дає можливість завчасно попередити та відреагувати на можливість виходу елемента за «пориг безпеки». Запропоновано засоби візуалізації локальних та прогностичних оцінок елементів системи, які дозволяють оперативно реагувати на виявлені або потенційні недоліки. Ефективність запропонованих методів проілюстровано на прикладі аналізу якості об'єктів колійного та станційного господарства залізничної транспортної системи України.

### **ВСТУП**

У 1908 р. академік А.М. Крилов започаткував теорію оцінювання якості складних систем (СС) [1] з розробки методу вирішення проблеми вибору найкращого з поміж 50 наданих проекту лінійного корабля. Слід було здійснити узагальнену оцінку кожного з цих проектів з урахуванням великої кількості характеристик, які визначали ефективність та надійність численних систем судна. Для одержання цієї оцінки необхідно було дати відповідь на такі питання:

- характеристики яких елементів системи потрібно включити до розгляду для одержання обгрунтованого узагальненого висновку;
- яким чином оцінити значення кожної з характеристик;
- як визначити пріоритетність характеристик, що розглядаються;
- який спосіб обрати для узагальнення оцінок заданого набору характеристик.

З того часу перелік систем, які підлягають оцінюванню, питань, які потребують відповіді для формування об'єктивного та обгрунтованого висновку про якість системи та методів, що дають можливість ці відповіді отримати, суттєво розширився [2–6]. Зокрема, для СС, які складаються з десятків тисяч елементів і більше, перше питання розділилося на два: які елементи слід включати в процедуру оцінювання та які характеристики цих елементів мають бути враховані [7]. Відповідь на перше з цих питань визначається метою оцінювання: якщо досліджується процес реалізації однієї з цілей системи, до складу, структурної схеми і процедури оцінювання включають елементи, безпосередньо задіяні у досягненні цієї цілі [2]. Щодо переліку

характеристик, які підлягають оцінюванню, то він має бути повним, тобто враховувати усі особливості стану та якості функціонування елемента, необхідні для реалізації заданої цілі. Одночасно цей перелік має бути мінімально достатнім, тобто не долучати характеристик, подібних вже включеним у перелік оцінюваних [8]. Питання: «Яким чином оцінити значення кожної з характеристик?», також було поділено на два: які критерії та параметри застосовувати для аналізу поведінки кожної з оцінюваних характеристик та яку шкалу оцінок використовувати для формування заключного висновку. Зрозуміло, що лише багатокритеріальний та багатопараметричний аналіз дозволяє провести різнобічне дослідження поведінки оцінюваної характеристики [9–10]. При цьому набір критеріїв та параметрів також має бути мінімально достатнім. Загалом кількість критеріїв та параметрів визначається особливостями характеристик досліджуваного елемента та метою оцінювання [11–12].

Для формування висновку у різний час різними авторами використовувались неперервна, цілочисельна або понятійна («відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно») [13–15] шкали оцінок. Оцінка у неперервній шкалі формується за значенням функціонала, який у метриці певного функціонального простору визначає відхилення досліджуваної характеристики від прийнятого еталону [4, 14]. У цілочисельній, наприклад, відсотковій шкалі кожному значенню цього функціонала ставиться у відповідність ціле число в межах мінімально та максимально допустимого значення цього функціонала [6, 17]. Коли кількість градацій цілочисельної шкали є невеликою (2–5), їх значенням можна співставити [15, 18] понятійну шкалу. Кожна з цих шкал має свої переваги і недоліки. Значення неперервної шкали є найбільш точними, але, водночас, найменш зрозумілими кінцевому користувачу, наприклад, лікарю чи працівнику залізниці. Значення оцінок понятійної шкали можуть бути занадто «розмитими», адже оцінка «задовільно» може означати все що завгодно від «майже добре» до «ледь краще незадовільного». Цілочисельна, наприклад, відсоткова шкала є достатньо точною та зрозумілою, однак не дозволяє хоча б частково визначити причини виявлених недоліків. Незрозумілість або нечіткість оцінки, неясність причин появи незадовільного чи близького до нього висновку може призвести до прийняття неадекватного рішення. У цій статті ми пропонуємо уточнену бальну шкалу оцінок, яка поєднує переваги неперервної та понятійної шкал (точність та зрозумілість) та дозволяє частково визначити причини появи негативних висновків.

Пріоритетність характеристик елементів, включених у процедуру оцінювання, визначають експерти даної предметної області. Спосіб узагальнення оцінок характеристик та їх пріоритетність у реалізації цілі функціонування елемента системи безумовно відіграє важливу роль у побудові обґрунтованого висновку про його якість, однак визначальним у цьому процесі все ж таки є об'єктивність та коректність самих локальних оцінок.

Вибір характеристик елементів, критеріїв, параметрів та шкал їхнього оцінювання здійснюється [3, 12, 14] під час побудови методів локального оцінювання, як складової загальної методики комплексного детермінованого оцінювання системи, загальний опис який було подано у [2]. Ще однією її складовою, яка описується у цій статті, є методи прогностичного аналізу поведінки характеристик елементів системи. Необхідність прогностичного оцінювання пояснюється тією обставиною, що задовільний стан або якість функціонування елемента у момент останнього планового дослідження зовсім не означає, що вони збережуться такими ж до наступного [19]. Тобто,

прогностичний аналіз поведінки елемента дозволяє завчасно виявити та упередити потенційні ризики від його виходу з ладу.

**Мета роботи** — розробка з використанням уточненої бальної шкали методів локального та прогностичного оцінювання поведінки характеристик стану та якості функціонування елементів складних систем та зручних засобів візуалізації отриманих висновків для оперативного реагування на виявлені або потенційні загрози.

### ЛОКАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ НЕПЕРЕРВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Локальне оцінювання елементів складних систем визначається типом характеристик, які їх описують, та виглядом областей еталонних та допустимих значень цих характеристик. Оцінку характеристики  $f(x)$ ,  $x \in [0, X]$ , де  $x$  — просторова або часова змінна, яка описує стан або процес функціонування елемента системи, здійснюємо за наступним алгоритмом. Нехай  $F[0, X]$  — область допустимих значень  $f(x)$ ,  $x \in [0, X]$ ,  $\{F_i[0, X]\}_{i=3}^5$  — підобласті  $F[0, X]$ , які визначають основну позитивну цілочисельну бальну оцінку  $e(f)$  характеристики  $f(x)$ . Тобто оцінка  $e(f) = i$ , якщо  $f \in F_i[0, X]$ ,  $i = 3, 4, 5$ , та  $e(f) = 2$ , якщо  $f \notin F[0, X]$ . Уточнена бальна оцінка будується так:

$$E(f) = e(f) + (1 - \|P_{F_i}(f)\|_V) / v_i,$$

якщо  $e(f) = i$ ,  $i = 3, 4$ . Тут  $P_{F_i}(f)$  — проекція на підобласть  $F_i[0, X]$  значень характеристики  $f(x)$ , основна бальна оцінка якої дорівнює  $i$ ,  $v_i$  — нормуючий коефіцієнт,  $\|\cdot\|_V$  — норма функціонального простору  $V$ . Наприклад, для  $C_0[0, X]$

$$v_i = \max_{x \in F_i[0, X]} f(x) - \min_{x \in F_i[0, X]} f(x),$$

а у разі  $L_2[0, X]$   $v_i$  є пропорційним до площі підобласті  $F_i[0, X]$ ,  $i = 3, 4$ , [20]. Якщо підобласть еталонних значень  $F_5[0, X]$  вироджується до кривої  $f_{em}(x)$ , то запропонований алгоритм оцінює міру відхилення характеристики  $f(x)$  від прийнятого еталону її поведінки або від розв'язку відповідної задачі оптимального керування, якщо такий вдається відшукати. Цей алгоритм також використовується для оцінювання першої похідної характеристики  $f(x)$ , який дає можливість проаналізувати динаміку її зміни на проміжку  $[0, X]$ . Так осцилююча динаміка характеристик стану колії впродовж ділянки свідчить про зниження комфортності та безпеки руху поїздів, особливо зі збільшенням їхньої швидкості.

Розглянемо детальніше алгоритм локального оцінювання для випадку, коли  $F_5[0, X] = f_{em} \equiv \text{const}$ . Нехай  $SD = SD = \{S_m\}_{m=1}^{\tilde{M}} \cup \{D_m\}_{m=1}^M$  — деяка підсистема складної ієрархічно-мережевої системи (СІМС) [2], яка утворюється із взаємопов'язаних базових підсистем (БПС — підсистем найнижчого рівня розбиття, складовими яких є елементи системи), тобто є сукупністю вузлів  $S_m$ ,  $m = \overline{1, \tilde{M}}$ , та поєднуючих їх ребер  $D_m$ ,  $m = \overline{1, M}$ . У праці [2]

у якості прикладу реальної СІМС розглядалася залізнична транспортна система (ЗТС) України. У цьому випадку найпростішим прикладом підсистеми  $SD$  є відділок, як послідовність станцій та перегонів між ними. Поділимо ребро  $D_m$  на послідовність елементарних ділянок  $\{D_{m,n}\}_{n=1}^{N_m}$  довжиною  $X_{m,n}$ , стан кожної з яких описується набором характеристик  $\{f_{m,n,i}(x)\}_{i=1}^{I_{N_m}}$ ,  $x \in [0, X_{m,n}]$ ,  $n = \overline{1, N_m}$ . Нехай для характеристики  $f_{m,n,i}(x)$  область допустимих значень має вигляд  $F_{m,n,i}[0, X_{m,n}] = \{f_{m,n,i}(x) : f_{m,n,i}^{em} \leq f_{m,n,i}(x) \leq f_{m,n,i}^{max}, x \in [0, X_{m,n}]\}$ , де  $f_{m,n,i}^{max}$  — максимально допустиме відхилення характеристики  $f_{m,n,i}(x)$  від її еталонного значення  $f_{m,n,i}^{em}$  (рис.1). Визначимо підобласті  $F_{m,n,i}[0, X_{m,n}]$  поведінки характеристики  $f_{m,n,i}(x)$ , які відповідають різним значенням цілочисельної бальної шкали оцінок. Вважаємо, що вона є «відмінною», якщо  $f_{m,n,i}(x) = f_{m,n,i}^{em}$ . Підобласть  $(f_{m,n,i}^{em}, \gamma]$  відповідає поведінці «добре». Значення  $\gamma \in [f_{m,n,i}^{em}, f_{m,n,i}^{max}]$  встановлюють експерти. Підобласть  $(\gamma, f_{m,n,i}^{max}]$  відповідає поведінці «задовільно». Якщо значення характеристики  $f_{m,n,i}(x)$  у будь-якій точці проміжку  $[0, X_{m,n}]$  перевищують величину  $f_{m,n,i}^{max}$ , то її поведінка вважається «незадовільною». Зрозуміло, що поведінка характеристики  $f_{m,n,i}(x)$  визначається за її найбільшим відхиленням від еталону, тобто значенням

$$\|f_{m,n,i}(x) - f_{m,n,i}^{em}\|_{C_0[0, X_{m,n}]} = \max_{x \in [0, X_{m,n}]} |f_{m,n,i}(x) - f_{m,n,i}^{em}|.$$

Прикладом характеристики такого типу для елементарної ділянки колії, яка є горизонтальною прямою, є характеристика, яка визначає взаємне розміщення рейок у вертикальній площині під час руху поїзда з максимальними для цієї ділянки швидкістю і вагою. У цьому випадку  $f_{m,n,i}^{em} = 0$  мм,  $f_{m,n,i}^{max} = 18$  мм,  $\gamma = 8$  мм [21].

Оцінювання поведінки досліджуваної характеристики будемо здійснювати за двома параметрами. За першим формуємо уточнену бальну оцінку  $e_c(f_{m,n,i})$  на основі аналізу величини максимальних збурень  $f_{m,n,i}(x)$  на елементарній ділянці  $D_{m,n}$ , а саме вважаємо  $e_c(f_{m,n,i})$  рівною:

- 2, якщо  $f_{m,n,i}^{max} < \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]}$ ;
- $3 + (f_{m,n,i}^{max} - \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]}) / (f_{m,n,i}^{max} - \gamma)$ ,

якщо  $\gamma < \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]} \leq f_{m,n,i}^{max}$ ;

- $4 + (\gamma - 4 + (\gamma - \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]}) / \gamma) / \gamma$ ,

якщо  $f_{m,n,i}^{\max} f_{m,n,i}^{\max} < \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]} \leq \gamma$ ;

- 5, якщо  $\|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]} \equiv f_{m,n,i}^{em}$ .

За другим параметром формуємо уточнену бальну оцінку  $e_l(f_{m,n,i})$  на основі аналізу масовості збурень  $f_{m,n,i}(x)$  на елементарній ділянці  $D_{m,n}$ , а саме вважаємо  $e_l(f_{m,n,i})$  рівною:

- 2, якщо  $f_{m,n,i}^{\max} < \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]}$ ;
- $3 + ((f_{m,n,i}^{\max} - \gamma)\sqrt{X_{m,n}} - \|f_{m,n,i}(x) - \gamma\|_{L_2[0, X_{m,n}]}) / (f_{m,n,i}^{\max} - \gamma) - \sqrt{X_{m,n}}$ ,

якщо  $\lambda \leq \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]} \leq f_{m,n,i}^{\max}$ ;

- $4 + (\|\gamma - f_{m,n,i}(x)\|_{L_2[0, X_{m,n}]}) / \gamma \leq \sqrt{X_{m,n}}$ ,

якщо  $f_{m,n,i}^{\max} < \|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]} \leq \gamma$ ;

- 5, якщо  $\|f_{m,n,i}(x)\|_{C_0[0, X_{m,n}]} \equiv f_{m,n,i}^{em}$ .

Розглянемо приклади поведінки характеристик, основна цілочисельна оцінка яких є «задовільною» (рис. 1). Оцінки характеристик, які відображаються лініями 1 і 2, у рівномірній метриці є рівними, а саме  $e_c(f_{m,n,1}) = e_c(f_{m,n,2}) = 3,10$ . Однак, їхня поведінка є суттєво різною. Якщо значення першої характеристики є близькими до критичного лише в одній точці, то другої — на всій ділянці  $D_{m,n}$ . Аналогічно, оцінки характеристик, які відображаються лініями 1 і 3, у середньо-квадратичній метриці також є рівними, а саме  $e_l(f_{m,n,1}) = e_l(f_{m,n,3}) = 3,94$ . Однак, якщо перша з цих характеристик має «критичну» точку, то друга поводить себе «майже добре» на всій ділянці  $D_{m,n}$ . Таким чином, використання однопараметричних оцінок не дає адекватного уявлення щодо поведінки досліджуваної характеристики елемента системи. У той же час, пара  $e_c(f_{m,n,1}) = 3,10$ ,  $e_l(f_{m,n,1}) = 3,94$  означає, що впродовж обраної елементарної ділянки є лише точкові місця, де значення  $f_{m,n,1}(x)$  близькі до допустимих меж, які можна усунути за допомогою незначного локального ремонту; пара  $e_c(f_{m,n,2}) = 3,10$ ;  $e_l(f_{m,n,2}) = 3,02$  свідчить, що стан ділянки з огляду на досліджувану характеристику близький до «незадовільного» і потребує серйозного ремонту; пара  $e_c(f_{m,n,3}) = 3,95$ ;  $e_l(f_{m,n,3}) = 3,94$  означає, що стан ділянки з огляду на досліджувану характеристику близький до «доброго». Тобто, побудовані нами оцінки дають достатньо конкретну, обґрунтовану та зрозумілу пересічному користувачеві інформацію, наприклад, під час дослідження стану колії: локальні збурення, які можна усунути шляхом незначного точкового ремонту, загалом майже добрий стан, стан, який потребує термінового ремонту ділянки колії тощо. Зрозуміло, що витрати, необхідні для виконання точкового та капітального ремонту колії є неспівмірними.

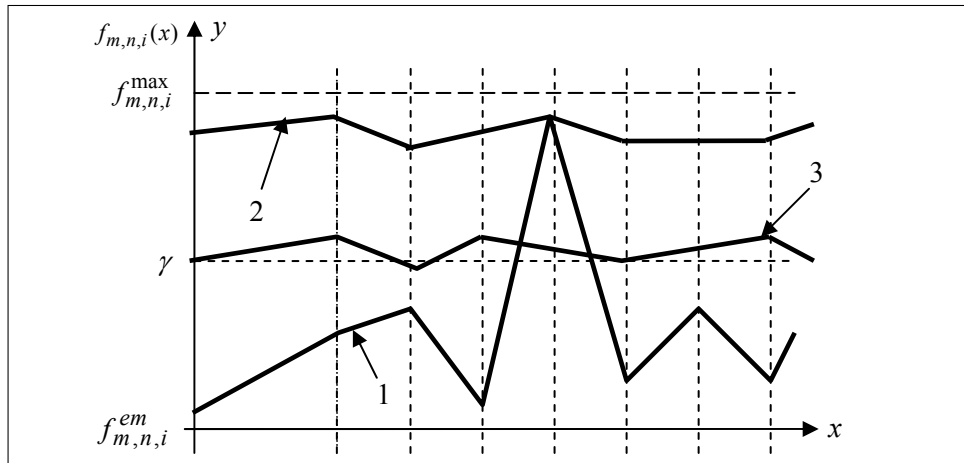


Рис. 1. Три приклади поведінки характеристик, основна цілочисельна оцінка яких є «задовільною»

Загалом кількість характеристик для визначеного (найпростішого) типу ділянки колії перевищує сорок, для яких у процесі дослідження нами було виділено чотири основні типи поведінки [11, 20]. Кожен з них, окрім способу відбору даних відрізняється виглядом областей еталонних та допустимих значень, способом формування підобластей області допустимих значень, які визначають поведінку характеристики та можуть бути неоднозв'язними, вибором функціоналів, за якими проводиться оцінювання тощо, тобто потребує застосування різних варіантів описаного вище алгоритму локального оцінювання.

### ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛОКАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Сумарна кількість оцінок характеристик елементів системи, наприклад, колійного господарства ЗТС, може сягати мільйонів одиниць [11, 21]. Зрозуміло, що ця інформація потребує розробки спеціальних методів візуалізації результатів оцінювання, зручних для оперативної локалізації виявлених недоліків [22]. На рис. 2 показано діаграму розподілу оцінок характеристик елемента БПС ( $k$  — загальна кількість характеристик елемента). Заштрихована область відповідає характеристикам, які не оцінювались.

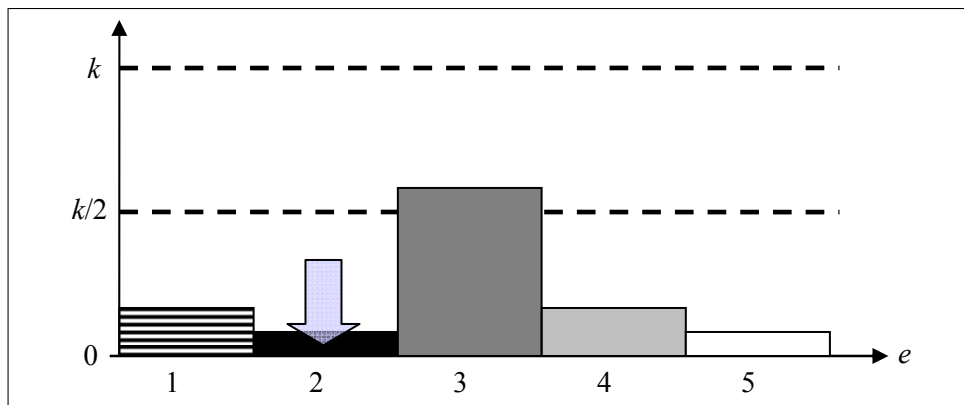



Рис. 2. Розподіл характеристик елемента  $D_{m,n}$  за оцінками

Клікання курсором на стовпці діаграми супроводжується відображенням характеристик (таблиця), цілочисельна частина оцінки яких має відповідне значення. Характеристики можуть слідувати або в порядку їх пріоритетності, або в порядку зростання оцінок.

Клікання курсором по назві характеристики у таблиці супроводжується відображенням графіка її поведінки на фоні області допустимих значень та підобластей, які відповідають цілочисельним бальним оцінкам, а також таблиці її числових значень.

**Т а б л и ц я .** Перелік характеристик елемента  $D_{m,n}$  з оцінкою «задовільно»

№	Характеристика	$e_c(f_{m,n,i})$	$e_l(f_{m,n,i})$
$i_1$	Характеристика $f_{m,n,i_1}$	3,05	3,16
 $i_2$	Характеристика $f_{m,n,i_2}$	3,11	3,14
...	...	...	...
$i_L$	Характеристика $f_{m,n,i_L}$	3,79	3,85

### ЛОКАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ДИСКРЕТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Існує чимало прикладів реальних СІМС, стан та функціонування елементів яких може характеризуватись не лише функціональними залежностями, на які були орієнтовані описані вище алгоритми локального оцінювання, але й наборами числових значень, що відображають параметри стану чи реалізації певних функцій [23–25]. До таких характеристик відносяться, зокрема, часові інтервали виконання операцій над потоком у вузлі, наприклад, над поїздом на станції (посадка та висадка пасажирів, прийом та видача пошти, огляд поїзда, заміна локомотиву на вузлових станціях тощо). Оцінки таких процесів будуються на основі аналізу часових відхилень реального виконання операції від передбаченого встановленим графіком [23].

Нехай  $\mathbf{O} = \{O_n\}_{n=1}^N$  — повний цикл операцій, що необхідно виконати над потоком  $P$  у вузлі  $S$ ,  $\mathbf{O}_{N_i} = \{O_{n_1}, O_{n_2}, \dots, O_{n_i}\} \subset \mathbf{O}$ ,  $\sum_{i=1}^I N_i = N$  — підмножини операцій, які необхідно виконувати послідовно, причому операції з різних підмножин  $\mathbf{O}_{N_i}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , можуть виконуватися паралельно. Позначимо  $\tau^e = \{\tau^e(O_n)\}_{n=1}^N$ , де  $\tau^e(O_n)$  — час виконання операції  $O_n$  згідно графіка,  $\tau^{\min} = \{\tau^{\min}(O_n)\}_{n=1}^N$ ,  $\tau^{\min}(O_n)$  — мінімально допустимий час виконання операції  $O_n$ ,  $\tau^p = \{\tau^p(O_n)\}_{n=1}^N$ ,  $\tau^p(O_n)$  — реальний час виконання операції  $O_n$ . Оцінювання якості роботи вузла має проводитися без врахування попередніх затримок потоку, які сталися з незалежних від цього вузла причин.

Позначимо  $\tau^{\min}(\mathbf{O}_{N_i}) = \sum_{n_1, n_2, \dots, N_i} \tau^{\min}(O_n)$ ,  $\tau^{\circ}(\mathbf{O}_{N_i}) = \sum_{n_1, n_2, \dots, N_i} \tau^{\circ}(O_n)$ ,  
 $\tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) = \sum_{n_1, n_2, \dots, N_i} \tau^P(O_n)$ . Якість виконання  $e_S(P, \mathbf{O}_{N_i})$  послідовності операцій  $\mathbf{O}_{N_i}$  реальної обробки потоку  $P$  у вузлі  $S$  будемо вважати рівною:

- 5, якщо  $\tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) = \tau^{\min}(\mathbf{O}_{N_i})$ ;
- $4 + (\tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) - \tau^{\circ}(\mathbf{O}_{N_i})) / (\tau^{\min}(\mathbf{O}_{N_i}) - \tau^{\circ}(\mathbf{O}_{N_i}))$ ,

якщо  $\tau^{\min}(\mathbf{O}_{N_i}) < \tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) \leq \tau^{\circ}(\mathbf{O}_{N_i})$ ;

- $3 + (\tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) - T_{PS}^{\circ}) / (\tau^{\circ}(\mathbf{O}_{N_i}) - T_{PS}^{\circ})$ ,

якщо  $\tau^{\circ}(\mathbf{O}_{N_i}) < \tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) \leq T_{PS}^{\circ}$ ;

• 2, якщо  $\tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) > T_{PS}^{\circ}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , де  $T_{PS}^{\circ}$  — час перебування потоку  $P$  у вузлі  $S$  згідно з графіком.

Для оцінювання якості виконання  $e_S(P, O_n)$  окремої операції з послідовності  $\mathbf{O}_{N_i}$  використовуємо подібний алгоритм, а саме вважаємо її рівною:

- 5, якщо  $\tau^P(O_n) = \tau^{\min}(O_n)$ ;
- $4 + (\tau^P(O_n) - \tau^{\circ}(O_n)) / (\tau^{\min}(O_n) - \tau^{\circ}(O_n))$ ,

якщо  $\tau^{\min}(O_n) < \tau^P(O_n) \leq \tau^{\circ}(O_n)$ ;

- $3 + (\tau^P(O_n) - T_{PS}^{\circ}) / (\tau^{\circ}(O_n) - T_{PS}^{\circ})$ ,

якщо  $\tau^P(O_n) : \tau^{\circ}(O_n) < \tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) \leq T_{PS}^{\circ}$ ,  $O_n \in \mathbf{O}_{N_i}$ ;

- 2, якщо  $\tau^P(O_n) : \tau^P(\mathbf{O}_{N_i}) > T_{PS}^{\circ}$ ,  $O_n \in \mathbf{O}_{N_i}$ ,  $n = \overline{1, N_i}$ ,  $i = \overline{1, I}$ .

Останні дві оцінки означають, що тривалість операції  $O_n \in \mathbf{O}_{N_i}$  є такою, що час виконання послідовності  $\mathbf{O}_{N_i}$  може наблизитися до часу обробки  $T_{PS}^{\circ}$  потоку у вузлі згідно з графіком чи перевищити його відповідно. Загалом перерозподіл часу виконання окремих операцій в рамках послідовності  $\mathbf{O}_{N_i}$  може бути змінним та залежати від об'єму кожної з них. Однак, якщо у вузлі  $S$  під час обробки певного типу потоків виконання окремої операції регулярно оцінюється «незадовільно», то слід ретельно проаналізувати причини появи такого висновку.

Якість обробки  $e_S(P)$  потоку  $P$  у вузлі  $S$  визначаємо за співвідношенням

$$e_S(P) = \langle \mathbf{p}, e_S(P, \mathbf{O}) \rangle_{R^I} / \langle \mathbf{p}, \mathbf{1} \rangle_{R^I}, \quad (1)$$

де  $\langle \cdot, \cdot \rangle_{R^I}$  — скалярний добуток в евклідовому просторі  $R^I$ ,  $e_S(P, \mathbf{O}) = \{e_S(P, \mathbf{O}_{N_i})\}_{i=1}^I$ ,  $\mathbf{p} = \{\rho_i\}_{i=1}^I$  — вектор вагових коефіцієнтів, які визначають пріоритетність послідовностей операцій  $\mathbf{O}_{N_i}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $\mathbf{1} = \{1\}_{i=1}^I$ .



Звичайно, якість обробки окремого потоку не може визначати якість роботи вузла загалом. Достатньо обґрунтований висновок можемо сформулювати на основі аналізу роботи вузла з обслуговування сукупності потоків різних типів, які проходять через нього протягом заданого періоду часу. Більш детальні висновки отримуємо, аналізуючи роботу вузла з виконання послідовностей операцій чи окремих операцій над потоками за ті ж проміжки часу.

Припустимо, що рух потоків у системі є періодичним і  $T_0$  — мінімальний проміжок часу, який враховує визначену графіком періодичність проходження потоків через вузол  $S$ . Нехай  $T^k$  — період тривалістю  $T_0$ ,  $\mathbf{P}^k = \{P_l^k\}_{l=1}^{L_k}$  — сукупність потоків, які проходять через вузол  $S$  за  $k$ -тий період,  $k = \overline{1, K}$ ,  $K$  — кількість тестових досліджень, проведених над кожним із потоків сукупності  $\mathbf{P}^k$ , під час планового огляду роботи вузла. Якість обробки  $E_S^K(\mathbf{P}_l)$  потоку  $P_l$  у вузлі  $S$  протягом  $K$  періодів  $T_0$  оцінюємо за співвідношенням

$$E_S^K(\mathbf{P}_l) = \langle e_S(\mathbf{P}_l), \mathbf{1} \rangle_{R^K} / K,$$

де  $e_S(\mathbf{P}_l) = \{e_S(P_l^k)\}_{k=1}^K$  — вектор оцінок виду (1) якості обробки потоку  $P_l \in \mathbf{P}_l = \{P_l^k\}_{k=1}^K$ ,  $l = \overline{1, L_k}$ , під час  $k$ -того періоду  $T_0$ ,  $k = \overline{1, K}$ .

Якість обробки  $E_S(\mathbf{P}^k)$  сукупності потоків  $\mathbf{P}^k$ , які проходять через вузол  $S$  за  $k$ -й період, визначаємо за співвідношенням

$$E_S(\mathbf{P}^k) = \langle \tilde{\rho}, \mathbf{E}_S(\mathbf{P}^k) \rangle_{R^{L_k}} / \langle \tilde{\rho}, \mathbf{1} \rangle_{R^{L_k}}, \quad (2)$$

де  $\tilde{\rho} = \{\rho_l\}_{l=1}^{L_k}$  — вектор вагових коефіцієнтів, які визначають пріоритетність потоків  $P_l$ ,  $l = \overline{1, L_k}$ ,  $\mathbf{E}_S(\mathbf{P}^k) = \{E_S(P_l^k)\}_{l=1}^{L_k}$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Аналогічні узагальнені висновки можна отримувати для послідовностей операцій над потоками окремих типів із сукупності  $\mathbf{P}^k$ , а також, у разі потреби, конкретних операцій над ними.

Якість роботи вузла протягом  $K$  періодів  $T_0$  за станом обробки сукупності потоків  $\mathbf{P}^k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , визначаємо за співвідношенням

$$E_S^K(\mathbf{P}) = \langle \mathbf{E}_S(\mathbf{P}), \mathbf{1} \rangle_{R^K} / K,$$

де  $\mathbf{E}_S(\mathbf{P}) = \{E_S(\mathbf{P}^k)\}_{k=1}^K$ . Аналіз послідовності  $E_S(\mathbf{P}^k)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , дає можливість визначати причини незадовільної обробки у вузлі певних категорій потоків.

Наведений алгоритм ми можемо застосувати, наприклад, для оцінювання якості обробки поїздів різних категорій на окремій станції ЗТС. При цьому нерідко його результати дозволяють покращити якість обробки певного регулярного поїзда, незначно змінивши графік його руху. Тут ми об-

межили процедуру локального оцінювання рівнем БПС системи, оскільки при аналізі процесу обробки потоків, які проходять через вузол, поелементна деталізація процесу зазвичай є надлишковою. Така деталізація є доцільною, зокрема, при дослідженні процесу формування складу поїзда на сортувальній станції тощо.

## ПРОГНОСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ

Прогностичне оцінювання може бути коротко- та довготерміновим та передбачати прогнозування як оцінок, так і поведінки характеристик елементів системи. Розглянемо алгоритм короткострокового прогнозування значень оцінки характеристики елемента. Нехай  $\{e(t_j)\}_{j=1}^J$ ,  $J \geq 2$  — передісторія оцінок певної характеристики, одержаних під час здійснення послідовності планових досліджень у моменти часу  $t_j \in [0, T]$ ,  $j = \overline{1, J}$  за період  $T$ . Позначимо  $\Phi(t) = \{\varphi_j(t)\}_{j=1}^J$  систему лінійно незалежних функцій, визначених на проміжку  $[0, T]$ . Побудуємо функцію  $e(t) = \langle \mathbf{A}, \Phi(t) \rangle_{R^J}$ , де  $\mathbf{A} = \{a_j\}_{j=1}^J$  — вектор невідомих коефіцієнтів. Тоді прогнозоване значення оцінки  $e(t)$  обраної характеристики в момент часу  $t_{J+1}$ , наприклад, наступного планового дослідження, одержується із співвідношення  $e(t_{J+1}) = \langle \mathbf{A}, \Phi(t_{J+1}) \rangle_{R^J}$ , у якому вектор  $\mathbf{A}$  визначається з умови  $\langle \mathbf{A}, \Phi(t_k) \rangle_{R^J} = e(t_k)$ ,  $k = \overline{1, J}$ . Вибір системи базисних функцій може визначатися експериментально встановленим характером поведінки оцінок характеристик досліджуваного об'єкта. Так оцінка стану об'єктів ЗТС поводиться відповідно до експоненційного закону [19], що і визначає вибір системи  $\Phi(t)$ . Результати прогностичного оцінювання можуть розглядатися як складові локального та відобразитися на діаграмах і таблицях, подібних зображеним на рисунках 2 та 3.

Виявлено ще один недолік цілочисельних бальних оцінок, який полягає в тому, що вони не дозволяють здійснювати коректні прогнози навіть на короткострокову перспективу. Дійсно, екстраполяція послідовності  $e(t_k) = 3$ ,  $k = 1, 2, 3$  дає значення  $e(t_4) = 3$ . У той же час послідовність  $e(t_1) = 3, 84$ ,  $e(t_2) = 3, 49$ ,  $e(t_3) = 3, 11$  дає прогноз  $e(t_4) < 3$ , тобто нижче «порогу безпеки». Прогностичний аналіз уточнених оцінок дає можливість визначити момент часу, коли понятійна оцінка зменшиться на одиницю при тому ж режимі експлуатації та за відсутності факторів, які можуть різко погіршити стан чи якість функціонування елемента системи. А саме, виходячи з поведінки послідовності  $\{e(t_j)\}_{j=1}^J$  тобто враховуючи, що  $e(t)$  є монотонно спадаючою функцією, час наступного дослідження можна визначити з умови  $e(t) \geq e^*$ , де  $e^*$  — значення, яке відповідає понятійній оцінці на одиницю меншій, ніж встановлена на момент останнього огляду.

Термін короткострокового прогнозу  $t_{J+1}$  природно обмежувати часом наступного планового дослідження оцінюваних об'єктів, стан яких у ре-

зультаті слідуєчого за ним ремонту стрибкоподібно покращується. Процедура прогностичного оцінювання поведінки характеристики елемента полягає у прогнозуванні її поточкових значень та здійснюється за допомогою описаного вище екстраполяційного алгоритму. Її доцільно проводити лише для тих характеристик, для яких отримано негативний прогноз оцінки на момент наступного планового дослідження.

Повертаючись до сформованих вище оцінок отримуємо, що прогностичний аналіз пар  $e_c(f_{m,n,i})$ ,  $e_l(f_{m,n,i})$  поведінки характеристик  $f_{m,n,i}$  дозволяє визначити стан елементарної ділянки колії на момент наступного її планового огляду та попередити можливий вихід за «поріг безпеки»,  $i = \overline{1, I_{N_m}}$ ,  $n = \overline{1, N_m}$ ,  $m = \overline{1, M}$ .

Екстраполяція значень визначеної за співвідношенням (1) послідовності  $e_S(P_l^k)$ , дає можливість прогнозувати якість обробки потоку  $P_l$ ,  $l = \overline{1, L_k}$ ,  $k = \overline{1, K}$ , у вузлі, наприклад, поїзда на станції, на короткострокову перспективу. Значення визначеної у (2) послідовності  $E_S(\mathbf{P}^k)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , дає можливість здійснювати прогностичний аналіз роботи вузла системи. Для довгострокового прогнозування, яке включає в себе кілька періодів планових досліджень та слідуєчих за ними ремонтів, використовуємо апарат часових рядів [20, 26].

За аналогічним принципом здійснюємо побудову локальних та прогностичних оцінок стану та якості функціонування елементів вузлів  $S_m$ ,  $m = \overline{1, \widetilde{M}}$ , на момент останнього та наступного планового дослідження.

Різновидом прогностичного оцінювання можна вважати перевірку відповідності стану та якості функціонування елементів системи новим вимогам, наприклад, пов'язаним з її модернізацією. Недотримання цієї відповідності не дасть можливості досягти очікуваного результату модернізації. Таке оцінювання доцільно здійснювати, наприклад, перед початком виготовлення підприємством нових видів продукції. Оцінка готовності обладнання, кваліфікації персоналу, безперебійного постачання потрібних комплектуючих є необхідною передумовою успішного започаткування нового виробництва. Подібна ситуація виникає за потреби інтенсифікації виробництва, тобто скороченні часу виконання кожної із операцій виробничого циклу. У цьому випадку прогностичне оцінювання здійснюється з використанням алгоритмів локального оцінювання зі зміною областей допустимих та еталонних значень поведінки характеристик елементів системи у відповідності до нових вимог.

Яскравим прикладом наслідків непроведення такого роду прогностичного аналізу є досвід впровадження на УЗ потягів Hyundai Rotem. Максимальна швидкість руху цих потягів складає 350 км/год [27]. На дорогах країни-виробника вони рухаються із середньою швидкістю, яка перевищує 250 км/год. Передбачалося, що на залізницях України вони рухатимуться із середньою швидкістю не меншою 160 км/год. Насправді, у 2012 р. середня швидкість руху складала менше 110 км/год. [28], тобто незначно перевищувала швидкість руху звичайних поїздів. Основна причина ситуації, що склалася, полягає у якості колійного та станційного господарства УЗ, непідгото-

вленість яких призвела до неможливості досягнення встановленої швидкості, частих поломок та багатогодинних затримок поїздів Hyundai Rotem (одна година простою такого потяга коштує близько 300 тис. грн [29]). Тобто, для досягнення очікуваного результату, слід було перед впровадженням швидкісного руху оцінити відповідність показників стану залізниць України нормативам, прийнятим на залізницях країни-виробника, та модернізувати їх згідно з цими нормативами. Це дало б можливість уникнути проблем, що виникли з експлуатацією швидкісних поїздів на коліях УЗ.

## **ВИСНОВКИ**

У роботі описано методи локального і прогностичного оцінювання поведінки характеристик елементів реальних СІМС. Ці методи є складовими загальної методики комплексного оцінювання складних систем з ієрархічно-мережевою структурою, описаної у [2]. Застосування багатопараметричної уточненої бальної шкали оцінок дозволяє не лише адекватно оцінити поведінку характеристики елемента системи, але й частково локалізувати причини виявлених недоліків. Методи локального та прогностичного аналізу дозволяють сформулювати набори оцінок, на основі яких здійснюється побудова узагальнених висновків про стан та процес функціонування об'єктів системи на всіх рівнях ієрархії. Описана методика та запропоновані способи візуалізації результатів оцінювання використовується під час розробки програмного забезпечення для дослідження стану та якості функціонування колійного та станційного господарства УЗ [11, 20].

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Соломенко Н.С.* Академик Алексей Николаевич Крылов — выдающийся математик, механик и кораблестроитель // Вестник АН СССР. — 1988. — № 12. — С. 70–79.
2. *Поліщук Д.О., Поліщук О.Д., Яджак М.С.* Комплексное детерминированное оценивание сложных иерархически-сетевых систем. Часть I. Описание методики // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 1. — С. 21–31.
3. *Поліщук Д.О., Поліщук О.Д., Яджак М.С.* Порівняння методів оцінювання складних систем // Відбір і обробка інформації. — 2010. — Вип. 32 (108). — С. 110–118.
4. *Bloom M., Fischer J., Orme J.* Evaluating practice. — Allyn and Bacon, 2006. — 488 p.
5. *Patton M.Q.* How to use qualitative methods in evaluation. — Sage Publications, 1987. — 490 p.
6. *Hwang C.L., Tillman F.A., and Lee J.* System-reliability evaluation techniques for complex/ large systems. A review // IEEE Transactions, Reliability. — 1981. — **30.5**. — P. 416–423.
7. *Калашиников В.В.* Сложные системы и методы их анализа. — М.: Знание, 1980. — 211 с.
8. *Железнов И.Г., Семёнов Г.П.* Комбинированная оценка характеристик сложных систем. — М.: Машиностроение, 1978. — 56 с.
9. *Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н.* Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. — М.: Наука, 1986. — 354 с.

10. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. — М.: Машиностроение, 2004. — 458 с.
11. Поліщук Д.О. Модель локального оцінювання стану елементів колійного господарства Укрзалізниці // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна. — 2012. — Вип. 41. — С. 158–166.
12. Polishchuk O. Optimization of estimation of man's musculoskeletal system // Computer Mathematics and Calculation Optimization. — 2001. — 2. — P. 360–367.
13. Хованов Е.В. Математические основы теории шкал измерения качества. — Л.: ЛГУ, 1982. — 412 с.
14. Polishchuk D., Polishchuk O. About evaluation of complex dynamical systems // Journal of Complex Systems. — 2013, Article ID 204304, 6 p.: — <http://dx.doi.org/10.1155/2013/204304>.
15. Крейнис З.Л., Коршунова Н.П. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути. — М.: УМК МПСР, 2001. — 768 с.
16. Азгальдов Г.Г., Азгальдова Л.А. Количественная оценка качества. — М.: Статистика, 1971. — 348 с.
17. Матвеев А.П., Тилевич М.Е. Методика оценки и прогнозирования технического уровня промышленной продукции // Методология и практика оценки качества продукции. — 1988. — Вып. 2. — С. 38–42.
18. Крутько В.Н., Славин М.Б., Смирнова Т.М. Математические основания геронтологии: Общая теория здоровья; теория надёжности в живых и неживых системах; современные методы анализа биологического возраста, старения и продолжительности жизни. — М.: URSS. ru, 2002. — 384 с.
19. Lichtberger B.W. Kostensenkung durch qualitätsvorrat in der fahrweginstandhaltung // Der Eisenbahningenieur. — 1999. — 50, № 1. — P. 39–42.
20. Поліщук Д.О. Модель локального оцінювання станційного господарства Укрзалізниці // Зб. наук. праць IV Конф. молодих учених із сучасних проблем механіки і марематики ім. ак. Я.С. Підстригача. — 24–27 травня 2011 р. — Львів. — С. 178–181.
21. Крейнис З.Л., Коршунова Н.П. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути. — М.: УМК МПСР, 2001. — 768 с.
22. Norros L., Saviola P. Usability evaluation of complex systems. A literature review. — Helsinki: STUK, 2004. — 44 p.
23. Поліщук А.Д., Поліщук Д.А. Оценка качества обработки потоков в узлах сетевых структур // Acta Universitatis Pontica Euxinus. — 2013. — Special Number. — 2. — P. 443–445.
24. Polishchuk D., Polishchuk O., Yadzhak M. Solution of some problems of evaluation of the complex systems // Proc. of the 15<sup>th</sup> Int. conf. on automatic control, 23–26 September 2008. — Odesa: ONMA. — P. 968–976.
25. Bar-Yam Y. About engineering complex systems: Multiscale analysis and evolutionary engineering // Engineering Self-Organising Systems: Methodologies and Applications. — Springer, 2005. — P. 16–31.
26. Поліщук Д., Яджак М. Використання часових рядів для прогнозування оцінки якості функціонування складних систем // Зб. праць Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми механіки і математики». — 25–29 травня 2008. — Львів. — Т. 3. — С. 38–40.
27. Офіційний сайт компанії «Hyundai Rotem». — <https://www.hyundai-rotem.co.kr>.
28. Дубецька О. Укрзалізниця випускає на колії конкурента Hyundai. — <https://www.real-economy.com.ua/publication/22/34408.html>.
29. Покупку Hyundai признали главной ошибкой 2012 года. — <http://kp.ua/life/372536-pokupku-Hyundai-pryznaly-hlavnoi-oshybkoi-2012-hoda>.

Надійшла 28.05.2013