

УДК 519.6+625.1

**КОМПЛЕКСНЕ ДЕТЕРМІНОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ
СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ.
ІІІ. АГРЕГОВАНЕ 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, які утворюють систему. Описано основні підходи до побудови узагальнених висновків про стан та якість функціонування системи різних рівнів ієрархії: методи «найслабшого» елемента, зваженої лінійної та нелінійної агрегації. Визначено області їхнього застосування та проаналізовано основні переваги та недоліки. Детально розглянуто різні напрямки реалізації методу зваженої лінійної агрегації оцінок елементів системи та її базових підсистем. Запропоновано принципи візуалізації результатів агрегованого оцінювання для оперативної локалізації структурних елементів системи, які отримали негативні або близькі до них висновки. Ефективність запропонованих методів проілюстровано на прикладі аналізу якості об'єктів колійного та станційного господарства залізничної транспортної системи України.

ВСТУП

У праці [1] було запропоновано методику комплексного детермінованого оцінювання (МКДО) стану, якості функціонування та взаємодії елементів складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС). Ця методика є поєднанням методів локального, прогностичного, інтерактивного та агрегованого оцінювання об'єктів, які утворюють систему. За допомогою методів локального оцінювання здійснено багатокритеріальний та багатопараметричний аналіз характеристик, які описують стан та процес функціонування елементів системи. Прогностичний аналіз цих характеристик дозволяє здійснювати коротко- та довготермінове прогнозування їхньої поведінки. Методи локального та прогностичного оцінювання були описані у праці [2]. Основна проблема, яка виникає у результаті застосування цих методів, полягає у великій кількості отриманих висновків, сумарна кількість яких може сягати мільйонів одиниць. Зрозуміло, що оперативний аналіз таких обсягів інформації та прийняття на їх основі адекватних рішень — складна проблема. Одним із способів її вирішення є застосування методів агрегації локальних та прогностичних оцінок [3–6].

Мета роботи — побудова узагальнених висновків щодо стану та якості функціонування об'єктів системи різних рівнів ієрархії. Саме опису методів агрегованого оцінювання та принципам візуалізації отриманих за їх допомогою результатів, які дозволяють оперативно орієнтуватись у великій кількості отриманих висновків та своєчасно реагувати на виявлені недоліки, присвячено цю роботу. Проаналізовано основні підходи до побудови узагальнених висновків, визначено їх переваги та недоліки та запропоновано метод, який дозволяє формувати обґрунтовані висновки для мережевих систем із повністю впорядкованим рухом потоків.

АГРЕГОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ: ОСНОВНІ ПІДХОДИ

Визначальна риса ієрархічно-мережевих структур полягає в тому, що кожна підсистема системи на певному рівні ієрархії поділяється на сукупність підсистем, які є підмережею мережі нижчого рівня ієрархії. Отже, на кожному ієрархічному рівні система є мережею, тобто сукупністю вузлів, поєднаних ребрами, по яких здійснюється рух потоків. Підсистеми найнижчого рівня розбиття називатимемо базовими (БПС). У якості прикладу реальної СІМС розглядаємо [7–10] залізничну транспортну систему (ЗТС) України. Згідно з територіально-ієрархічним принципом побудови системи управління, Укрзалізниця (УЗ) послідовно поділяється на 6 регіональних залізниць, 27 дирекцій залізничних перевезень, 110 дистанцій колійного господарства та більш ніж 1200 відділків, які є послідовністю станцій та міжстанційних перегонів. Така структуризація встановлює чіткий взаємозв'язок між об'єктами ЗТС та підрозділами УЗ, які відповідають за їхній стан та якість функціонування. На найнижчому рівні ієрархії ЗТС є мережею, базовими підсистемами якої є станції (вузли) та міжстанційні перегони (ребра), а потоками у ній — поїзди. На вищих рівнях ієрархії УЗ є мережею, потоками в якій є інформація, управлінські та організаційні рішення. Подібний принцип структуризації дійсний для багатьох транспортних систем інших типів, систем постачання ресурсів та товарів, економічних та фінансових систем тощо [11–14].

Кожну з БПС системи поділяємо на елементи, тобто об'єкти, які мають чітко визначене просторове розміщення, функціональне призначення та набір характеристик, які описують їхній стан і процес функціонування, з відповідними типами областей допустимих значень поведінки цих характеристик. Поведінку кожної характеристики оцінюємо за певним набором критеріїв і параметрів та називаємо локальними оцінками стану та якості функціонування елемента [2]. На основі передісторії локальних оцінок, отриманих у результаті планових досліджень системи, будуємо прогностичні оцінки поведінки характеристик на коротко- та довгострокову перспективу [2, 15]. Повертаючись до прикладу ЗТС, елементами міжстанційного перегону є ділянки, які розділено штучними спорудами (мостами, переїздами тощо), відрізняються своїми просторовими, конструктивними, геологічними та іншими особливостями і не перевищують довжину 1 км. Кількість характеристик, які описують стан елементарної ділянки колії, перевищує сорок, сумарна кількість оцінок характеристик елементів лише колійного господарства ЗТС сягає кількох мільйонів [9]. Зрозуміло, що такі обсяги інформації практично не піддаються оперативному аналізу та своєчасній реакції на

виявлені недоліки, що у випадку залізниці нерідко призводить до катастрофічних наслідків. Найбільш розповсюдженим способом, який полегшує аналіз великих масивів оціночної інформації, є формування узагальнених висновків про стан та якість функціонування об'єктів, які утворюють складну систему (СС), на різних рівнях ієрархії. Для побудови таких висновків можна використовувати три підходи. Проілюструємо їх на найпростішому прикладі системи S , яка складається з N елементів s_n , $n = \overline{1, N}$. Нехай $e(s_n)$ — оцінка якості елемента s_n у шкалі $[e^{\min}, e^{\max}]$.

Якість системи $e(S)$ за першим підходом визначається якістю її «найслабшого» елемента, тобто $e^{(1)}(S) = \min_{n=1, N} e(s_n)$. Такий підхід використовується для оцінювання систем, збої в роботі елементів яких можуть призвести до виходу з ладу окремих підсистем або всієї СС загалом. До таких систем відноситься людський організм, незадовільне функціонування окремих органів якого може призвести до летальних наслідків, тріщина в рейці колії може стати причиною залізничної аварії та зупинити рух на лінії тощо. Можна навести ще чимало подібних прикладів.

Другим та найбільш розповсюдженим підходом [3–5] є зважена лінійна агрегація оцінок, отриманих для елементів та підсистем кожного рівня ієрархії з врахуванням їх пріоритетності для отримання узагальненого висновку наступного рівня ієрархії. Для випадку розглянутої вище системи S ця оцінка отримується за співвідношенням

$$e^{(2)}(S) = \langle \rho, \mathbf{e}(s) \rangle_{R^N} / \langle \rho, \mathbf{1} \rangle_{R^N}.$$

Тут і нижче $\langle \cdot, \cdot \rangle_{R^N}$ — скалярний добуток в евклідовому просторі R^N , $\mathbf{e}(s) = \{e(s_n)\}_{n=1}^N$, $\rho = \{\rho_n\}_{n=1}^N$ — вектор вагових коефіцієнтів, який визначає пріоритетність елементів системи, $\mathbf{1} = \{1\}_{n=1}^N$. Основним недоліком методу лінійної агрегації є нівелювання як позитивних, так і негативних оцінок. Розглянемо наступний приклад. Нехай для виготовлення певного пристрою необхідне постачання N рівноважливих комплектуючих. Навіть у випадку постачання 100 відсотків $(N-1)$ -ї з необхідних комплектуючих та 10 відсотків N -ї комплектуючої, можна виготовити лише 10% пристроїв. У той же час, оцінка, отримана за допомогою методу лінійної агрегації при $\rho = \{1\}_{n=1}^N$, віднесена до стовідсоткової шкали $[e^{\min}, e^{\max}] = [0, 100]$, дає значення $e^{(2)}(S) = 100 - 90/N$. При великих значеннях N ця оцінка є близькою до 100%, що очевидно не відповідає дійсності, оскільки все ще можна виготовити лише 10% пристроїв. Описані підходи доцільно поєднувати, а саме: після усунення виявлених під час застосування першого підходу недоліків (допостачання частини комплектуючих, якої бракує), для отримання узагальненого висновку використовувати метод лінійної агрегації.

Більш адекватний дійсності результат узагальнення отримуємо за допомогою методу нелінійної агрегації [6]. Він базується на наступних міркуваннях [16]. Нехай $\{a_n\}_{n=1}^N$ — набір дійсних чисел таких, що $\sum_{n=1}^N a_n = A$.

Серед усіх таких наборів величина $\prod_{n=1}^N a_n$ досягає свого максимального значення, коли $a_n = A/N$, $n = \overline{1, N}$. Якщо $\{a_n\}_{n=1}^N$ є набором оцінок, це означає, що найкращий результат серед усіх наборів досягається у випадку, коли відхилення значень a_n , $n = \overline{1, N}$, від серед нього значення $a^* = A/N$ є мінімальним. У методі нелінійної агрегації для випадку розглянутої вище системи S оцінка її якості отримується [6] за співвідношенням

$$e^{(3)}(S) = \prod_{n=1}^N e(s_n) / (e^*)^{N-1},$$

де $e^* = \sum_{n=1}^N e(s_n) / N$. Основним недоліком, який суттєво обмежує використання третього підходу для оцінювання якості системи, є складність врахування пріоритетності об'єктів, які її утворюють. Для розглянутого вище прикладу при $N = 3$ оцінки, отримані за допомогою розглянутих вище підходів, у відсотковій шкалі матимуть наступні значення: $e^{(1)}(S) = 10\%$, $e^{(2)}(S) = 70\%$, $e^{(3)}(S) = 20,4\%$.

АГРЕГОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ

Нехай $SD = \{S_m\}_{m=1}^{\tilde{M}} \cup \{D_m\}_{m=1}^M$ — підсистема, яка утворюється із взаємопов'язаних БПС, тобто є сукупністю вузлів S_m , $m = \overline{1, \tilde{M}}$, та ребер, які їх поєднують, D_m , $m = \overline{1, M}$. У випадку ЗТС найпростішим прикладом такої підсистеми 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 $\{f_{m,n,i}(x)\}_{i=1}^{I_{N_m}}$, $x \in [0, X_{m,n}]$, $n = \overline{1, N_m}$. Оцінювання поведінки характеристики $f_{m,n,i}(x)$ здійснюємо за двома параметрами [2]. 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 $D_{m,n}$. 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.

Стан елемента за відсутності незадовільних оцінок його характеристик у рівномірній та середньоквадратичній метриках оцінюємо за співвідношеннями

$$H_{m,n}^c = \langle \mathbf{p}_m, \mathbf{e}^c(\mathbf{f}_{m,n}) \rangle_{R^{I_{N_m}}} / \langle \mathbf{p}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{I_{N_m}}}, \quad (1)$$

$$H_{m,n}^l = \langle \mathbf{p}_m, \mathbf{e}^l(\mathbf{f}_{m,n}) \rangle_{R^{I_{N_m}}} / \langle \mathbf{p}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{I_{N_m}}} \quad (2)$$

відповідно. Тут $\mathbf{e}^c(\mathbf{f}_{m,n}) = \{e^c(f_{m,n,i})\}_{i=1}^{I_{N_m}}$, $\mathbf{e}^l(\mathbf{f}_{m,n}) = \{e^l(f_{m,n,i})\}_{i=1}^{I_{N_m}}$ — вектори уточнених бальних оцінок характеристики $f_{m,n,i}$ елемента n базової

підсистеми D_m у рівномірній та середньоквадратичній метриках, $\mathbf{p}_m = \{\rho_{m,i}\}_{i=1}^{I_{N_m}}$ — вектор вагових коефіцієнтів, який визначає пріоритетність характеристик елементів, $n = \overline{1, N_m}$, $m = \overline{1, M}$.

Узагальнений висновок щодо стану елементарної ділянки $D_{m,n}$ за сукупністю параметрів оцінки визначається співвідношенням

$$H_{m,n} = (\rho^c H_{m,n}^c + \rho^l H_{m,n}^l) / (\rho^c + \rho^l), \quad (3)$$

де ρ^c, ρ^l — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність параметрів оцінки, $n = \overline{1, N_m}$, $m = \overline{1, M}$. Аналогічним чином здійснюється оцінювання характеристик елементів вузлів S_m , $m = \overline{1, \tilde{M}}$, підсистеми SD .

У деяких випадках якість функціонування елемента можна визначити, використовуючи локальні та прогностичні оцінки характеристик його стану. Дійсно, основна функція залізничної колії полягає у забезпеченні плавного, безпечного руху поїздів із максимально встановленою швидкістю, реалізація якої безпосередньо залежить від стану колії. Тому можна прийняти оцінку якості функціонування залізничної колії $e_{m,n}^f$ на ділянці $D_{m,n}$, що дорівнює:

- 5, якщо $H_{m,n} = 5$;
- $4 + \tau / (t_c - t_n)$, якщо $H_{m,n} \geq 4$ і запланований згідно з нормативом ремонт зі збереженням цілочисельної частини оцінки стану можна відтермінувати на час $\tau \leq t_c - t_n$, де t_n, t_c — моменти наступного та того, що за ним слідує згідно з графіком ремонту;
- $3 + \tau / (t_c - t_n)$, якщо $H_{m,n} \geq 3$ і запланований згідно з нормативом ремонт зі збереженням цілочисельної частини оцінки стану можна відтермінувати на час $\tau \leq t_c - t_n$;
- 2, якщо $H_{m,n} = 2$.

Узагальнений висновок щодо якості функціонування БПС D_m визначено за співвідношенням $E_{D_m}^f = \langle \mathbf{e}_m^f, \mathbf{1} \rangle_{R^N} / N$, де $\mathbf{e}_m^f = \{e_{m,n}^f\}_{n=1}^N$. Зрозуміло, що оцінки $e_{m,n}^f$ ґрунтуються на результатах прогностичного аналізу стану колії на ділянці $D_{m,n}$.

Важливим показником оцінювання є рівень покриття оцінками характеристик елемента БПС із урахуванням їх пріоритетності, який визначається співвідношенням

$$C_{D_{m,n}} = 100\% \times \langle \mathbf{p}_m, \boldsymbol{\delta}_{m,n} \rangle_{R^{I_{N_m}}} / \langle \mathbf{p}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{I_{N_m}}}, \quad (4)$$

де $\boldsymbol{\delta}_{m,n} = \{\delta_{m,n,i}\}_{i=1}^{I_{N_m}}$,

$$\delta_{m,n,i} = \begin{cases} 0, & \text{якщо оцінка } i\text{-ї характеристики не проводилася,} \\ 1, & \text{якщо оцінка } i\text{-ї характеристики проводилася.} \end{cases}$$

Узагальнення оцінок окремих характеристик у рівномірній та середньоквадратичній метриках за сукупністю елементів, які утворюють БПС, послідовно здійснюється за співвідношеннями

$$V_{m,i}^c = \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{e}^c(\tilde{\mathbf{f}}_{m,i}) \rangle_{R^{N_m}} / \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{N_m}}, \quad (5)$$

$$V_{m,i}^l = \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{e}^l(\tilde{\mathbf{f}}_{m,i}) \rangle_{R^{N_m}} / \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{N_m}}, \quad (6)$$

де $\mathbf{e}^c(\tilde{\mathbf{f}}_{m,i}) = \{e^c(f_{m,n,i})\}_{n=1}^{N_m}$, $\mathbf{e}^l(\tilde{\mathbf{f}}_{m,i}) = \{e^l(f_{m,n,i})\}_{n=1}^{N_m}$ — вектори уточнених бальних оцінок характеристики $f_{m,n,i}$ для сукупності елементів БПС D_m у рівномірній та середньоквадратичній метриках, $\tilde{\mathbf{p}}_m = \{\tilde{p}_{m,n}\}_{n=1}^{N_m}$ — вектор вагових коефіцієнтів, який визначає пріоритетність елементів у структурі БПС. Тоді узагальнений висновок щодо стану елементарної ділянки $D_{m,n}$ для заданої характеристики визначається співвідношенням

$$V_{m,i} = (\rho^c V_{m,i}^c + \rho^l V_{m,i}^l) / (\rho^c + \rho^l), \quad i = \overline{1, I_{N_m}}. \quad (7)$$

Як видно із співвідношень (1)–(3) та (5)–(7), будуємо узагальнені оцінки у двох напрямках, які умовно називаємо «горизонтальним» (H) й «вертикальним» (V). Перший формує агреговані висновки про стан або якість функціонування окремого елемента БПС за сукупністю параметрів, критеріїв та характеристик, які підлягають оцінюванню. Він дозволяє ідентифікувати елементи, які отримали не задовільні або близькі до них оцінки. Другий напрямок формує агреговані висновки про стан або якість функціонування БПС системи за окремим параметром, критерієм або характеристикою елементів, які її утворюють. Він дозволяє визначити параметри, критерії або характеристики, відносно яких оцінки БПС також є незадовільними або близькими до них. Стосовно об'єктів ЗТС, «горизонтальний» напрямок оцінювання колії дає можливість виявити «критичні» ділянки окремого міжстанційного перегону, які потребують термінового ремонту. «Вертикальний» напрямок дозволяє визначити проблемні характеристики, наприклад, забрудненість земляного полотна, стан рейок або шпал на міжстанційному перегоні тощо.

Рівень покриття оцінками елементів БПС $D_{m,n}$ з урахуванням їх пріоритетності визначимо за співвідношенням

$$C_{D_m} = \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{C}_{D_m} \rangle_{R^{N_m}} / \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{N_m}}, \quad (8)$$

де $\mathbf{C}_{D_m} = \{C_{D_{m,n}}\}_{n=1}^{N_m}$.

Узагальнений висновок щодо стану БПС D_m на момент останнього планового дослідження за сукупністю елементів та їх характеристик, визначимо за співвідношенням

$$E_{D_m}^{s,P} = \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{H}_m \rangle_{R^{N_m}} / \langle \tilde{\mathbf{p}}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{N_m}} \equiv \langle \mathbf{p}_m, \mathbf{V}_m \rangle_{R^{I_{N_m}}} / \langle \mathbf{p}_m, \mathbf{1} \rangle_{R^{I_{N_m}}}, \quad (9)$$

де $\mathbf{H}_m = \{H_{m,n}\}_{n=1}^{N_m}$, $\mathbf{V}_m = \{V_{m,i}\}_{i=1}^{I_{N_m}}$.

За аналогічним принципом здійснюємо побудову зважених усереднених оцінок стану вузлів S_m , $m = \overline{1, \widetilde{M}}$, та якості функціонування ребер і вузлів підсистеми SD на момент останнього та наступного планового дослідження.

АГРЕГОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ БПС СИСТЕМИ

Наступний рівень узагальнення полягає у побудові послідовності зважених агрегованих оцінок, які формують висновок про стан та якість функціонування підсистеми SD загалом. А саме, узагальнений висновок про БПС D_m на останній та наступний моменти планових досліджень визначаємо за співвідношеннями

$$H_{D_m}^P = (\rho^{s,P} E_{D_m}^{s,P} + \rho^{f,P} E_{D_m}^{f,P})(\rho^{s,P} + \rho^{f,P}), \quad (10)$$

$$H_{D_m}^F = (\rho^{s,F} E_{D_m}^{s,F} + \rho^{f,F} E_{D_m}^{f,F})(\rho^{s,F} + \rho^{f,F}), \quad (11)$$

$$H_{D_m} = (\rho^P H_{D_m}^P + \rho^F H_{D_m}^F) / (\rho^P + \rho^F), \quad (12)$$

де $E_{D_m}^{s,P}$, $E_{D_m}^{f,P}$, $E_{D_m}^{s,F}$, $E_{D_m}^{f,F}$ — агреговані оцінки стану та якості функціонування БПС D_m на поточний та наступний терміни планових досліджень відповідно; $\rho^{s,P}$, $\rho^{f,P}$, $\rho^{s,F}$, $\rho^{f,F}$ — вагові коефіцієнти, які визначають їх пріоритетність; ρ^P , ρ^F — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність поточних та прогностичних оцінок $H_{D_m}^P$ й $H_{D_m}^F$ відповідно (у співвідношеннях (10)–(12) і нижче використані індекси s — state (стан), f — function (функціонування), P — Present (поточний), F — Future (наступний)). Аналогічним чином здійснюємо побудову узагальнених поточних та прогностичних висновків $H_{S_m}^P$, $H_{S_m}^F$, H_{S_m} щодо вузлів підсистеми SD .

Агрегований висновок щодо стану та якості функціонування всіх БПС підсистеми SD на момент останнього та наступного за планом дослідження послідовно здійснюємо наступним чином:

- стан вузлів та ребер на момент останнього планового дослідження визначаємо за співвідношенням

$$V_{SD}^{s,P} = \langle \rho_D, E_D^{s,P} \rangle_{R^M} / \langle \rho_D, \mathbf{1} \rangle_{R^M} + \langle \rho_S, E_S^{s,P} \rangle_{R^{\widetilde{M}}} / \langle \rho_S, \mathbf{1} \rangle_{R^{\widetilde{M}}}; \quad (13)$$

- стан вузлів та ребер на момент наступного планового дослідження — за співвідношенням

$$V_{SD}^{s,F} = \langle \rho_D, E_D^{s,F} \rangle_{R^M} / \langle \rho_D, \mathbf{1} \rangle_{R^M} + \langle \rho_S, E_S^{s,F} \rangle_{R^{\widetilde{M}}} / \langle \rho_S, \mathbf{1} \rangle_{R^{\widetilde{M}}}; \quad (14)$$

- якість функціонування вузлів та ребер на момент останнього планового дослідження — за співвідношенням

$$V_{SD}^{f,P} = \langle \rho_D, E_D^{f,P} \rangle_{R^M} / \langle \rho_D, \mathbf{1} \rangle_{R^M} + \langle \rho_S, E_S^{f,P} \rangle_{R^{\widetilde{M}}} / \langle \rho_S, \mathbf{1} \rangle_{R^{\widetilde{M}}}; \quad (15)$$

• якість функціонування вузлів та ребер на момент наступного планового дослідження — за співвідношенням

$$V_{SD}^{f,F} = \langle \rho_D, E_D^{f,F} \rangle_{R^M} / \langle \rho_D, \mathbf{1} \rangle_{R^M} + \langle \rho_S, E_S^{f,F} \rangle_{R^{\tilde{M}}} / \langle \rho_S, \mathbf{1} \rangle_{R^{\tilde{M}}}. \quad (16)$$

У співвідношеннях (13)–(16) $E_D^{s,P} = \{E_{D_m}^{s,P}\}_{m=1}^M$, $E_D^{s,F} = \{E_{D_m}^{s,F}\}_{m=1}^M$, $E_S^{s,P} = \{E_{S_m}^{s,P}\}_{m=1}^{\tilde{M}}$, $E_S^{s,F} = \{E_{S_m}^{s,F}\}_{m=1}^{\tilde{M}}$ й $\rho_D = \{\rho_{D_m}\}_{m=1}^M$, $\rho_S = \{\rho_{S_m}\}_{m=1}^{\tilde{M}}$ — вектори вагових коефіцієнтів, які визначають пріоритетність окремих ребер та вузлів підсистеми SD .

Стан та якість функціонування усіх БПС підсистеми SD з урахуванням прогнозу визначаємо за співвідношеннями

$$V_{SD}^s = (\rho^P V_{SD}^{s,P} + \rho^F V_{SD}^{s,F}) / (\rho^P + \rho^F), \quad (17)$$

$$V_{SD}^f = (\rho^P V_{SD}^{f,P} + \rho^F V_{SD}^{f,F}) / (\rho^P + \rho^F). \quad (18)$$

Узагальнений рівень покриття оцінками характеристик елементів БПС підсистеми SD визначаємо за співвідношенням

$$C_{SD} = \langle \rho_D, C_D \rangle_{R^M} / \langle \rho_D, \mathbf{1} \rangle_{R^M} + \langle \rho_S, C_S \rangle_{R^{\tilde{M}}} / \langle \rho_S, \mathbf{1} \rangle_{R^{\tilde{M}}}, \quad (19)$$

де $C_D = \{C_{D_m}\}_{m=1}^M$, $C_S = \{C_{S_m}\}_{m=1}^{\tilde{M}}$.

Остаточний висновок щодо якості підсистеми SD отримуємо із співвідношення

$$E_{SD} = (\rho^s V_{SD}^s + \rho^f V_{SD}^f) / (\rho^s + \rho^f) \equiv \langle \rho_D, H_D \rangle_{R^M} / \langle \rho_D, \mathbf{1} \rangle_{R^M} + \langle \rho_S, H_S \rangle_{R^{\tilde{M}}} / \langle \rho_S, \mathbf{1} \rangle_{R^{\tilde{M}}}, \quad (20)$$

де $H_D = \{H_{D_m}\}_{m=1}^M$, $H_S = \{H_{S_m}\}_{m=1}^{\tilde{M}}$, ρ^s , ρ^f — вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність оцінок стану та якості функціонування підсистеми SD . Аналогічний принцип побудови агрегованих оцінок використовуємо для формування узагальнених висновків про якість функціонування підсистем вищих рівнів ієрархії.

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АГРЕГОВАНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Принцип візуалізації результатів локального та першого рівня агрегованого оцінювання відображений у таблиці на рис. 1, у якій на перетині стовпців $e^c(f_{m,n,i})$, $e^l(f_{m,n,i})$ та рядків $D_{m,n}$ містяться оцінки характеристик кожного елемента БПС D_m , яке здійснюється для найпростішого випадку, тобто за одним критерієм та двома параметрами. Для елементів систем інших типів таке оцінювання може здійснюватися за сукупністю більшої кількості критеріїв та параметрів [17–20]. Під час програмної реалізації рівень затемнення кожної комірки таблиці є пропорційним числовому значенню оцінки

(100% затемнення відповідає значенню «незадовільно», 0% — значенню «відмінно»). Комірка є заштрихованою, якщо оцінювання для цієї характеристики не проводилося. Підвід курсора до обраної комірки супроводжується висвітленням у ній числових значень відповідної оцінки, клікання на комірці — відображенням графіка поведінки цієї характеристики на фоні області допустимих значень та підобластей, які відповідають цілочисельним бальним оцінкам, та таблиці її числових значень [2]. Такий спосіб візуалізації отриманих результатів дозволяє оперативно локалізувати «проблемні» характеристики та частково встановити причини негативних або близьких до них висновків. У цій таблиці також відображені значення рівня покриття оцінками характеристик елемента $C_{D_m,n}$ та рівень покриття оцінками C_{D_m} елементів БПС $D_{m,n}$, узагальнені оцінки у «горизонтальному» напрямку $H_{m,n}^c$, $H_{m,n}^l$, $H_{m,n}$ та «вертикальному» напрямку $V_{m,i}^c$, $V_{m,i}^l$, $V_{m,i}$, а також узагальнений висновок $E_{D_m}^{s,P}$ про стан БПС D_m загалом.

Елементарні ділянки	Оцінки									
	$e^c(f_{m,n,1})$	$e^l(f_{m,n,1})$	$e^c(f_{m,n,1N_m})$	$e^l(f_{m,n,1N_m})$	$C_{D_m,n}$	$H_{m,n}^c$	$H_{m,n}^l$	$H_{m,n}$
$D_{m,1}$							69%			
$D_{m,2}$	3,26	3,71					81%			
...							...			
D_{m,N_m}							24%			
$V_{m,i}^{c/l}$							C_{D_m}	$E_{D_m}^{s,P}$		
$V_{m,i}$										

Рис. 1. Оцінка стану елементів БПС за сукупністю характеристик

Запропонований спосіб візуалізації результатів оцінювання дає можливість уникнути недоліків лінійної агрегації, оскільки об'єкти з найнижчою оцінкою відстежуються досить легко.

Зображена на рис. 2 таблиця містить результати агрегованого оцінювання підсистеми SD , яка є лінійною послідовністю вузлів та поєднуючих їх ребер. Це є природним для багатьох СІМС (для ЗТС це станції та міжстанційні перегони, що знаходяться на лінії, яка поєднує деякі початковий та кінцевий пункти руху поїздів). На перетині стовпців $E^{s,P}$, $E^{s,F}$, $E^{f,P}$, $E^{f,F}$ та рядків D_m , $m = \overline{1, M}$, S_m , $m = \overline{1, M + 1}$, містяться результати агрегованого оцінювання стану та якості функціонування вузлів та ребер підсистеми SD на моменти поточного та наступного планового дослідження відповідно. Як і вище, при програмній реалізації алгоритмів агрегованого оцінювання БПС рівень затемнення кожної комірки таблиці є пропорційним числовому значенню оцінки. Комірка є заштрихованою, якщо оцінювання

для цієї БПС не проводилося. Підвід курсора до обраної комірки супроводжується висвітленням у ній числових значень відповідної оцінки, клікання на комірці — відображенням таблиць, подібних зображень на рис. 1, яка містять результати локального та прогностичного оцінювання обраної БПС системи. Такий спосіб візуалізації отриманих результатів дозволяє оперативно локалізувати «проблемні» БПС. У таблиці також відображені значення рівня покриття оцінками C_m БПС підсистеми SD , узагальнені оцінки $H_{D_m}^P$, $H_{D_m}^F$, H_{D_m} , $V_{SD}^{s,P}$, $V_{SD}^{s,F}$, $V_{SD}^{f,P}$, $V_{SD}^{f,F}$, V_{SD}^s , V_{SD}^f , визначені співвідношеннями (10)–(19), відповідно, та остаточний висновок якості підсистеми E_{SD} .

SD	$E^{s,P}$	$E^{s,F}$	$E^{f,P}$	$E^{f,F}$	C_{D_m/S_m}	H_m^P	H_m^F	H_m
D_1					71%			
...					...			
D_M	3,54	3,22	←		74%			
S_1					61%			
...					...			
S_{M+1}					63%			
$V^{s/f,P/F}$					C_{SD}	E_{SD}		
$VH^{s/f}$								

Рис. 2. Поточна та прогностична агрегована оцінка стану та якості функціонування БПС, які утворюють окрему підсистему СІМС

Графічне відображення значень послідовностей $H_{D_m}^P$, $H_{S_m}^P$ або $H_{D_m}^F$, $H_{S_m}^F$, $m = \overline{1, M}$, з урахуванням рівня покриття оцінками об'єктів підсистеми SD дає можливість локалізувати проблемні ділянки ліній на момент останнього дослідження та дозволяє оперативно реагувати на виявлені або потенційні недоліки.

За аналогічним принципом будуються агреговані оцінки для підсистем усіх рівнів ієрархії. Пропоновані способи візуалізації результатів оцінювання дають можливість оперативно відстежувати об'єкти, для яких отримані негативні або близькі до них висновки, з метою виявлення та усунення причин їх появи. Навіть для таких систем, як ЗТС, незважаючи на величезні сумарні обсяги результатів оцінювання, кількість яких на локальному рівні сягає мільйонів одиниць, максимальна кількість кроків локалізації у пропонуваній моделі не перевищуватиме семи (УЗ → регіональна залізниця → дирекція → дистанція → відділок → БПС → елемент → характеристика).

ВИСНОВКИ

У працях [1, 2] і цій роботі запропоновано методику комплексного детермінованого оцінювання складних систем із ієрархічно-мережевою структурою, складовими якої є методи локального, прогностичного, інтерактивного та агрегованого оцінювання її основних об'єктів. Показано, що у поєднанні та застосовуючи уточнену бальну шкалу оцінок, вони формують достатньо повне, адекватне та цілісне уявлення щодо стану та якості функціонування елементів досліджуваної системи та її підсистем на всіх рівнях структуризації. Якщо локальні та прогностичні оцінки дають можливість привертати увагу до найбільш проблемних елементів системи та своєчасно реагувати на існуючі або потенційні ризики, то результати їх агрегованого оцінювання дають обґрунтовані кількісні підстави для планування матеріальних та фінансових витрат і необхідних людських ресурсів для модернізації окремих об'єктів, підсистем чи системи загалом. Вони також є підґрунтям для формування опосередкованих, але від того не менш вагомих висновків щодо якості роботи підрозділів СУ системи. Пропоновані принципи відображення результатів оцінювання різних типів та рівнів узагальнення дають можливість оперативно орієнтуватися у великій кількості одержаних висновків та локалізувати причини виявлених недоліків. Описана методика використовується при розробці програмного забезпечення для оцінювання стану та якості функціонування колійного та станційного господарства Укрзалізниці [9, 10].

ЛІТЕРАТУРА

1. Поліщук Д., Поліщук О., Яджак М. Комплексне оцінювання складних систем з ієрархічно-мережевою структурою: I. Опис методики // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 1. — С. 21–31.
2. Поліщук Д., Поліщук О., Яджак М. Комплексне оцінювання складних систем з ієрархічно-мережевою структурою: II. Локальне та прогностичне оцінювання // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 2. — С. 26–38.
3. Воронин А.Н. Метод многокритериальной оценки и оптимизации иерархических систем // Кибернетика и системный анализ. — 2007. — № 3. — С. 84–92.
4. Dombi J. Basic concepts for a theory of evaluation: the aggregative operator // European Journal of Operational Research. — 1982. — 10, № 3. — P. 282–293.
5. Богданчук В.З., Егоров Б.М., Катупев А.Н. Агрегирование векторных критериев. — Л.: ЛИИАН, 1990. — 214 с.
6. Polishchuk D., Polishchuk O. About evaluation of complex dynamical systems // Journal of Complex Systems. — 2013, Article ID 204304, 6 p.: Available. — <http://dx.doi.org/10.1155/2013/204304>.
7. Офіційний сайт Укрзалізниці. — <http://www.uz.gov.ua>.
8. Бакаев А.А. и др. Международные транспортные коридоры Украины: сети и моделирование. Том 1. Наземные виды транспорта. — К.: КУЭТТ, 2003. — 516 с.
9. Поліщук Д.О. Модель локального оцінювання стану елементів колійного господарства Укрзалізниці // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна. — 2012. — Вип. 41. — С. 158–166.

10. *Поліщук Д.О.* Модель локального оцінювання станційного господарства Укрзалізниці // 36. наук. праць IV Конф. молодих учених із сучасних проблем механіки і математики ім. акад. Я.С. Підстригача. — 24–27 травня 2011 р. — Львів. — С. 178–181.
11. *Поліщук Д.О., Поліщук О.Д.* Моніторинг потоку транспортних мереж із частково впорядкованим рухом // 36. наук. праць XXIII наук.-техн. конф. молодих науковців Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ. — 23–25 жовтня, 2013. — Львів, Україна. — С.326–329.
12. *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.
13. *Полянский С.В., Семенов И.Б., Чижов С.А.* Комплексное оценивание в задачах управления системами социально-экономического типа. — М.: ИПУ РАН, 1996. — 48 с.
14. *Хованов Н.В.* Оценка сложных экономических объектов и процессов в условиях неопределённости // Вестник СПбГУ. Сер. 5. — 2005. — Вып. 1. — С. 139–143.
15. *Поліщук Д., Яджак М.* Використання часових рядів для прогнозування оцінки якості функціонування складних систем // 36. праць Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми механіки і математики». — 25–29 травня 2008. — Львів. — Т. 3. — С. 38–40.
16. *Hardy G.H., Littlewood J.E., Polia G.* Inequalities. — Cambridge University Press, 1988. — 478 p.
17. *Polishchuk O.* Optimization of estimation of man's musculoskeletal system // Computer Mathematics and Calculation Optimization. — 2001. — 2. — P. 360–367.
18. *Bar-Yam Y.* About engineering complex systems: Multiscale analysis and evolutionary engineering // Engineering Self-Organising Systems: Methodologies and Applications. — London: Springer, 2005. — P. 16–31.
19. *Bloom M., Fischer J., Orme J.* Evaluating practice. — Allyn and Bacon, 2006. — 488 p.
20. *Polishchuk D., Polishchuk O., Yadzhak M.* Solution of some problems of evaluation of the complex systems // Proc. of the 15th Int. conf. on automatic control, 23–26 September 2008. — Odesa: ONMA. — P. 968–976.

Надійшла 28.08.2013