

**КОМПЛЕКСНЕ ДЕТЕРМІНОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ
СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ:
ІV. ІНТЕРАКТИВНЕ 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 метод інтерактивного оцінювання взаємодії основних об'єктів системи, який є ефективним засобом неперервного моніторингу якості їх функціонування. Цей метод дозволяє відстежувати динаміку зміни якості оброблення потоків у вузлах та їх проходження ребрами мережі, аналізувати оптимальність графіка руху потоків та його чутливість до малих затримок, оцінювати напруженість роботи основних об'єктів системи. Прогнозування поведінки інтерактивних оцінок дає змогу, не очікуючи чергового планового дослідження, виявляти елементи, які містять загрозу для нормального функціонування мережі, а їх агрегація дозволяє виявляти незадовільно функціонуючі об'єкти системи різних рівнів ієрархії. Ефективність методу ілюструється на прикладі аналізу взаємодії об'єктів залізничної транспортної системи України.

ВСТУП

Контроль стану та якості функціонування складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС) здійснюється шляхом регулярних планових досліджень та неперервного моніторингу роботи основних об'єктів системи. У праці [1] запропоновано методику комплексного детермінованого оцінювання СІМС, яка є поєднанням методів локального, прогностичного, агрегованого та інтерактивного аналізу стану, якості функціонування та взаємодії об'єктів, які утворюють систему. Описані у працях [2, 3] методи локального, прогностичного й агрегованого оцінювання системи ґрунтуються на результатах планових досліджень і дають досить повну й об'єктивну картину якості її стану та ефективності роботи. Основним недоліком планових досліджень системи є великі витрати матеріальних та фінансових ресурсів на їх проведення. До того ж задовільні результати останнього огляду можуть не зберегтися до наступного і окремі об'єкти системи можуть перетнути «пори́г безпеки» [4]. Основним способом уникнення ризиків та кризових ситуацій між плановими дослідженнями є неперервний моніторинг системи [5–8]. Найбільш

показово його необхідність проявляється у системі охорони здоров'я [9]. Локальні джерела виникнення небезпечних інфекційних захворювань без своєчасного реагування нерідко призводили до розповсюдження епідемій та їх переростання у пандемії. Такі наслідки визначили потребу в неперервному моніторингу стану здоров'я населення, який не обмежується лише фіксацією рівня захворюваності, але й відповідним реагуванням — підготовкою лікарень до прийому більшої кількості пацієнтів, введенням карантинних зон, постачанням необхідної кількості лікарських засобів та залученням додаткової кількості медичних працівників, відповідним інформуванням населення, проведенням профілактичних робіт тощо. В автотранспортних мережах неперервний моніторинг функціонування системи дозволяє серед іншого уникати заторів [10; 11], перерозподіляючи рух транспортних потоків альтернативними шляхами, на залізниці — виявляти причини регулярних затримок поїздів [12], на виробництві — уникати простою підприємств [13; 14] тощо.

Є чимало прикладів, коли функціонування системи неможливе без неперервного моніторингу та швидкого реагування на будь-яку зміну в негативному напрямі, оскільки це містить загрозу не просто збоїв, а і самого існування системи [15]. Об'єктивні результати моніторингу нерідко є головною передумовою для прийняття правильних своєчасних рішень у кризових ситуаціях [16].

У цій роботі запропоновано метод інтерактивного (від англ. interaction — взаємодія) оцінювання взаємодії основних об'єктів складних систем як ефективний засіб неперервного моніторингу системи. Аналізуючи взаємодії таких об'єктів мережі, як потоки та вузли і ребра, які розміщені на лініях руху потоків, можна формувати опосередковані, але від того не менш обґрунтовані висновки про їх стан, якість функціонування та напруженість роботи. Інтерактивне оцінювання дає змогу вчасно відстежувати об'єкти системи, стан яких наближається до незадовільного, та оперативно реагувати на виявлені недоліки. Результати неперервного моніторингу дозволяють здійснювати більш точний прогноз поведінки системи та виявляти до наступного планового огляду найбільш проблемні об'єкти, які потребують першочергового ретельного обстеження. Як і у працях [1–3], для ілюстрації результатів застосування пропонує алгоритмів інтерактивного оцінювання будемо використовувати як приклад СІМС залізничну транспортну систему (ЗТС).

Інтерактивне оцінювання руху та оброблення потоків. Інтерактивне оцінювання здійснюватимемо на рівні аналізу взаємодії таких об'єктів СІМС, як потік P_j , $j = \overline{1, M}$, і лінія $[S_0, S_N]$ (послідовність вузлів S_i , $i = \overline{1, N}$, та ребер, що сполучають їх, $D_i = (S_{i-1}, S_i)$, $i = \overline{0(1), N}$). Тут M — кількість потоків, які проходять лінією $[S_0, S_N]$ за певний проміжок часу. Припустимо, що проходження потоків по лінії є повністю детермінованим, тобто визначено графік їх руху. У випадку ЗТС вузлами лінії є станції, ребрами — міжстанційні перегони, потоками — потяги.

Затримка потоку на ребрі може бути спричинена такими обставинами, як незадовільний стан ребра, незадовільний стан потоку, неготовність вузла до приймання потоку тощо. Із перерахованих причин лише перша стосується

безпосередньо стану ребра. Затримка потоку у вузлі може спричинитися такими обставинами, як незадовільний стан або організація роботи вузла, незадовільний стан потоку, неможливість відправлення потоку у зв'язку з тим, що наступне у напрямку руху ребро зайняте іншими потоками тощо. Як і у попередньому випадку, серед зазначених причин лише перша стосується безпосередньо організації роботи вузла. Із проходженням потоків по лінії вплив наведених факторів може послідовно посилюватись та компенсуватись. Частина з них має випадковий характер, інші можуть бути регулярними. Основною метою інтерактивного оцінювання є виявлення і локалізація саме регулярних негативних факторів, які зумовлюють відхилення від встановленого графіка руху потоків.

Позначимо через $t_{j,i}^{c,g}$ час оброблення потоку P_j у вузлі S_i згідно з графіком, $t_{j,i}^{c,\min}$ — мінімально допустимий час його оброблення у цьому вузлі; $t_{j,i}^{c,r}$ — реальний час оброблення потоку; $t_{j,i}^{p,g}$ — час, за який потік P_j проходить ребро D_i згідно з графіком; $t_{j,i}^{p,\min}$ — мінімально допустимий час його проходження; $t_{j,i}^{p,r}$ — реальний час, за який потік проходить ребро; $j = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, N}$. Позначимо через T^0 мінімальний проміжок часу, який враховує визначену графіком періодичність руху потоків. Нехай T_k — період тривалістю T^0 з порядковим номером k , $k = \overline{1, K}$, $T^k = kT^0$. Зазвичай значення T^k не перевищує тривалості часового проміжку між плановими дослідженнями об'єктів, які утворюють лінію. Будемо вважати, що оцінка $e(P_j, S_i, T_k)$ якості оброблення потоку P_j у вузлі S_i за період T_k дорівнює:

– 5, якщо $t_{j,i}^{c,r} = t_{j,i}^{c,\min}$, тобто час оброблення максимально компенсує попередні затримки руху;

– 4 + $(t_{j,i}^{c,r} - t_{j,i}^{c,g}) / (t_{j,i}^{c,\min} - t_{j,i}^{c,g})$, якщо $t_{j,i}^{c,r} \in (t_{j,i}^{c,\min} - t_{j,i}^{c,g}]$, тобто час оброблення частково компенсує попередні затримки руху;

– 3 + $(t_{j,i}^{c,g} + t_{j,i}^{p,g} - t_{j,i}^{p,\min} - t_{j,i}^{c,r}) / (t_{j,i}^{p,g} - t_{j,i}^{p,\min})$, якщо $t_{j,i}^{c,r} \in (t_{j,i}^{c,g}, t_{j,i}^{c,g} + t_{j,i}^{p,g} - t_{j,i}^{p,\min}]$, тобто затримку потоку у вузлі можна повністю компенсувати на наступному ребрі, наприклад, завдяки безпечному збільшенню швидкості його руху;

– 2, якщо $t_{j,i}^{c,r} < t_{j,i}^{c,g} + (t_{j,i}^{p,g} - t_{j,i}^{p,\min})$, тобто затримку у вузлі неможливо компенсувати на наступному ребрі, $j = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, N}$, $k = \overline{1, K}$.

Будемо вважати, що оцінка $e(P_j, D_i, T_k)$ якості проходження потоком P_j ребра D_i за період T_k дорівнює:

– 5, якщо $t_{j,i}^{p,r} = t_{j,i}^{p,\min}$, тобто час проходження потоку ребром максимально компенсує попередні затримки руху;

– 4 + $(t_{j,i}^{p,r} - t_{j,i}^{p,g}) / (t_{j,i}^{p,\min} - t_{j,i}^{p,g})$, якщо $t_{j,i}^{p,r} \in (t_{j,i}^{p,\min} - t_{j,i}^{p,g}]$, тобто час проходження потоку ребром частково компенсує попередні затримки руху;

- 3 + $(t_{j,i}^{p,g} + t_{j,i}^{c,g} - t_{j,i}^{c,\min} - t_{j,i}^{p,r}) / (t_{j,i}^{c,g} - t_{j,i}^{c,\min})$, якщо $t_{j,i}^{p,r} \in (t_{j,i}^{p,g}, t_{j,i}^{p,g} + (t_{j,i}^{c,g} - t_{j,i}^{c,\min}))$], тобто затримку потоку на ребрі можна повністю компенсувати внаслідок скорочення часу оброблення у наступному вузлі;
- 2, якщо $t_{j,i}^{p,r} < t_{j,i}^{p,g} + (t_{j,i}^{c,g} - t_{j,i}^{c,\min})$, тобто затримку потоку на ребрі неможливо компенсувати в наступному вузлі, $j = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, N}$, $k = \overline{1, K}$.

Необхідність компенсації попередніх затримок руху підвищує напруженість роботи вузла або супроводу потоку на ребрі та пов'язані з цим ризики. Чисельно кількість компенсацій та зусилля вузла для їх реалізації виражаються дробовими частинами оцінок $e(P_j, S_i, T_k)$, які перевищують значення 4, або дробовими частинами оцінок $e(P_j, D_{i-1}, T_k)$, які є меншими за це значення. Так, оцінка $e(P_j, S_i, T_k) = 4,68$ означає, що роботу з обслуговування потоку P_j у вузлі S_i на інтервалі T_k проведено досить ефективно, оскільки у вузлі не лише у визначені терміни виконано всі операції над ним, але й компенсовані попередні затримки. Однак величина компенсації (0,68) означає, що ці затримки були досить істотними. Якщо ж значення $e(P_j, S_i, T_k) < 4$, компенсація затримки також виражається дробовою частиною оцінки і може здійснюватися на наступному по шляху слідування ребрі за рахунок збільшення швидкості потоку.

Зрозуміло, що одинична оцінка затримки окремого потоку в певному вузлі або на ребрі, наприклад, потяга на станції або міжстанційному перегоні, не може бути визначальним показником їх стану або якості функціонування. Більш обґрунтований висновок можна зробити, оцінюючи затримки одного чи сукупності потоків, які проходять через окремих вузол або послідовність вузлів та ребер лінії протягом заданого періоду часу T^K . Такі оцінки дають можливість принаймні частково локалізувати причини недоліків у функціонуванні окремих об'єктів СІМС, які розміщені на лінії або проходять по ній.

Інтерактивне оцінювання вузлів та ребер СІМС. Оцінку вузла S_i та ребра D_i за результатами оброблення потоку P_j протягом періоду T^K визначаємо за співвідношеннями

$$E(P_j, S_i, T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{e}(P_j, S_i, \mathbf{T}) \rangle_{R^K} / K, \tag{1}$$

$$E(P_j, D_i, T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{e}(P_j, D_i, \mathbf{T}) \rangle_{R^K} / K. \tag{2}$$

Тут $\langle \cdot, \cdot \rangle_{R^K}$ — скалярний добуток в евклідовому просторі R^K , $\mathbf{1} = \{1\}_{k=1}^K$, $\mathbf{e}(P_j, S_i, \mathbf{T}) = \{e(P_j, S_i, T_k)\}_{k=1}^K$, $\mathbf{e}(P_j, D_i, \mathbf{T}) = \{e(P_j, D_i, T_k)\}_{k=1}^K$, $\mathbf{T} = \{T_k\}_{k=1}^K$.
 Із послідовним збільшенням інтервалу T^K значення $E(P_j, S_i, T^K)$ дають змогу відстежувати динаміку зміни якості оброблення потоку P_j у вузлі S_i , а $E(P_j, D_i, T^K)$ — його проходження ребром D_i , $j = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, N}$.

Лінії мережі або об'єкти, які їх утворюють, можуть мати різну пріоритетність, яка зазвичай визначається кількістю та пріоритетністю потоків, які через них проходять. Оцінку вузла S_i та ребра D_i за результатами проходження сукупності потоків $\mathbf{P} = \{P_j\}_{j=1}^M$ протягом періоду T_k визначаємо за співвідношеннями

$$E_{\mathbf{P}}(S_i, T_k) = \langle \mathbf{R}_{\mathbf{P}}, \mathbf{e}(\mathbf{P}, S_i, T_k) \rangle_{R^M} / \langle \mathbf{R}_{\mathbf{P}}, \mathbf{1} \rangle_{R^M}, \quad (3)$$

$$E_{\mathbf{P}}(D_i, T_k) = \langle \mathbf{R}_{\mathbf{P}}, \mathbf{e}(\mathbf{P}, D_i, T_k) \rangle_{R^M} / \langle \mathbf{R}_{\mathbf{P}}, \mathbf{1} \rangle_{R^M}, \quad (4)$$

де $\mathbf{e}(\mathbf{P}, S_i, T_k) = \{e(P_j, S_i, T_k)\}_{j=1}^M$, $\mathbf{e}(\mathbf{P}, D_i, T_k) = \{e(P_j, D_i, T_k)\}_{j=1}^M$, $\mathbf{R}_{\mathbf{P}} = \{\rho_{P_j}\}_{j=1}^M$ — вектор вагових коефіцієнтів, які визначають пріоритетність потоків із сукупності $\{P_j\}_{j=1}^M$. Обчисливши $E_{\mathbf{P}}(S_i, T_k)$ і $E_{\mathbf{P}}(D_i, T_k)$ для кожного із k періодів, дістаємо послідовності оцінок, аналіз яких дозволяє виявляти циклічні зміни та прогнозувати поведінку якості оброблення потоків в окремому вузлі або їх проходження окремим ребром лінії.

Оцінку вузла S_i та ребра D_i за результатами проходження сукупності потоків \mathbf{P} протягом інтервалу T^K визначаємо за співвідношеннями

$$E_{\mathbf{P}}(S_i, T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(S_i, \mathbf{T}) \rangle_{R^M} / K, \quad (5)$$

$$E_{\mathbf{P}}(D_i, T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(D_i, \mathbf{T}) \rangle_{R^M} / K, \quad (6)$$

де $\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(S_i, \mathbf{T}) = \{E_{\mathbf{P}}(S_i, T_k)\}_{k=1}^K$, $\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(D_i, \mathbf{T}) = \{E_{\mathbf{P}}(D_i, T_k)\}_{k=1}^K$. Із послідовним збільшенням T^K значення цих оцінок дозволяють відстежувати динаміку зміни якості оброблення потоків у вузлі S_i та проходження ребер D_i , $i = \overline{1, N}$. Якщо оцінка $E(P_j, S_i, T^K)$ оброблення потоку P_j у вузлі S_i за період T^K значно менша від $E_{\mathbf{P}}(S_i, T^K)$ та (або) агрегована оцінка $E(P_j, D_i, T^K)$ його проходження ребром D_i за період T^K значно менша від $E_{\mathbf{P}}(D_i, T^K)$, то можна зробити висновок про наявність недоліків у графіку руху цього потоку. Оцінки $E_{\mathbf{P}}(S_i, T^K)$ і $E_{\mathbf{P}}(D_i, T^K)$, $i = \overline{1, N}$, де T^K — період між плановими дослідженнями об'єктів системи, та їх прогностичні значення на наступний період тривалістю T^K доцільно розглядати як складові агрегованого оцінювання [3].

Оцінки оброблення потоку P_j у послідовності вузлів $\mathbf{S} = \{S_i\}_{i=1}^N$ та їх проходження ребрами $\mathbf{D} = \{D_i\}_{i=1}^N$, які розміщені на лінії, протягом періоду часу T_k , визначаємо за співвідношеннями

$$E_{\mathbf{S}}(P_j, T_k) = \langle \mathbf{R}_{\mathbf{S}}, \mathbf{e}(P_j, \mathbf{S}, T_k) \rangle_{R^N} / \langle \mathbf{R}_{\mathbf{S}}, \mathbf{1} \rangle_{R^N}, \quad (7)$$

$$E_{\mathbf{D}}(P_j, T_k) = \langle \mathbf{R}_{\mathbf{D}}, \mathbf{e}(P_j, \mathbf{D}, T_k) \rangle_{R^N} / \langle \mathbf{R}_{\mathbf{D}}, \mathbf{1} \rangle_{R^N}, \quad (8)$$

де $\mathbf{e}(P_j, \mathbf{S}, T_k) = \{e(P_j, S_i, T_k)\}_{i=1}^N$, $\mathbf{e}(P_j, \mathbf{D}, T_k) = \{e(P_j, D_i, T_k)\}_{i=1}^N$ і $\mathbf{R}_S = \{\rho_{S_i}\}_{i=1}^N$, $\mathbf{R}_D = \{\rho_{D_i}\}_{i=1}^N$ — вектори вагових коефіцієнтів, які визначають пріоритетність вузлів та ребер лінії $[S_0, S_N]$ відповідно. Аналіз послідовностей $E_S(P_j, T_k)$ і $E_D(P_j, T_k)$, $j = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$, дозволяє виявляти циклічні зміни і прогнозувати якість оброблення потоку P_j у вузлах та проходження ребрами лінії $[S_0, S_N]$.

Оцінки оброблення потоку P_j у послідовності вузлів $\{S_i\}_{i=1}^N$ та його проходження ребрами $\{D_i\}_{i=1}^N$, які розміщені на лінії $[S_0, S_N]$, протягом часового інтервалу T^K визначаємо за співвідношеннями

$$E_S(P_j, T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{E}_S(P_j, \mathbf{T}) \rangle_{R^K} / K, \quad (9)$$

$$E_D(P_j, T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{E}_D(P_j, \mathbf{T}) \rangle_{R^K} / K, \quad (10)$$

де $\mathbf{E}_S(P_j, \mathbf{T}) = \{E_S(P_j, T_k)\}_{k=1}^K$, $\mathbf{E}_D(P_j, \mathbf{T}) = \{E_D(P_j, T_k)\}_{k=1}^K$. Із послідовним збільшенням T^K значення $E_S(P_j, T^K)$ та $E_D(P_j, T^K)$, $j = \overline{1, M}$, дозволяють відстежувати динаміку зміни якості оброблення потоку P_j у вузлах та його проходження ребрами лінії $[S_0, S_N]$.

Стосовно об'єктів ЗТС оцінки (1) і (2) дозволяють аналізувати динаміку зміни якості оброблення конкретного потяга на станції або його проходження міжстанційним перегонном, оцінки (3)–(6) — відстежувати динаміку зміни якості оброблення сукупності потягів на окремій станції або їх проходження окремим перегонном протягом визначеного одиничного періоду чи більшого часового інтервалу, а також виявляти недоліки встановленого графіка руху потягів, оцінки (7)–(10) — аналізувати якість оброблення конкретного потяга на послідовності станцій або його проходження міжстанційними перегонами лінії, а також чутливість графіка до малих затримок руху. Подібні приклади застосування результатів інтерактивного оцінювання можна навести і для багатьох інших реальних СІМС, зокрема із частково детермінованим рухом потоків по мережі [11].

Оцінку оброблення сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ у послідовності вузлів $\{S_i\}_{i=1}^N$, розміщених на лінії $[S_0, S_N]$, за період часу T_k визначаємо за співвідношенням

$$\begin{aligned} E_{\mathbf{P}, \mathbf{S}}(T_k) &= \langle \mathbf{R}_P, \mathbf{E}_S(\mathbf{P}, T_k) \rangle_{R^M} / \langle \mathbf{R}_P, \mathbf{1} \rangle_{R^M} = \\ &= \langle \mathbf{R}_S, \mathbf{E}_P(\mathbf{S}, T_k) \rangle_{R^N} / \langle \mathbf{R}_S, \mathbf{1} \rangle_{R^N}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $\mathbf{E}_S(\mathbf{P}, T_k) = \{E_S(P_j, T_k)\}_{j=1}^M$, $\mathbf{E}_P(\mathbf{S}, T_k) = \{E_P(S_i, T_k)\}_{i=1}^N$, $k = \overline{1, K}$. Аналіз цієї послідовності дозволяє виявляти циклічні зміни якості оброблення всіх потоків, які проходять вузлами лінії $[S_0, S_N]$, протягом інтервалу T_k .

Оцінку проходження сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ послідовністю ребер $\{D_i\}_{i=1}^N$, розміщених на лінії $[S_0, S_N]$, за період часу T_k визначаємо за співвідношенням

$$\begin{aligned} E_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(T_k) &= \langle \mathbf{R}_{\mathbf{P}}, \mathbf{E}_{\mathbf{D}}(\mathbf{P}, T_k) \rangle_{R^M} / \langle \mathbf{R}_{\mathbf{P}}, \mathbf{1} \rangle_{R^M} = \\ &= \langle \mathbf{R}_{\mathbf{D}}, \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(\mathbf{D}, T_k) \rangle_{R^N} / \langle \mathbf{R}_{\mathbf{D}}, \mathbf{1} \rangle_{R^N}, \end{aligned} \quad (12)$$

де $\mathbf{E}_{\mathbf{D}}(\mathbf{P}, T_k) = \{E_{\mathbf{D}}(P_j, T_k)\}_{j=1}^M$, $\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(\mathbf{D}, T_k) = \{E_{\mathbf{P}}(D_i, T_k)\}_{i=1}^N$, $k = \overline{1, K}$. Аналіз цієї послідовності дозволяє виявляти циклічні зміни якості проходження всіх потоків ребрами лінії $[S_0, S_N]$ протягом інтервалу T_k .

Оцінки оброблення сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ у послідовності вузлів $\{S_i\}_{i=1}^N$ та проходження ними ребер $\{D_i\}_{i=1}^N$, розміщених на лінії $[S_0, S_N]$, протягом часового інтервалу T^K визначаємо за співвідношеннями

$$E_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{E}_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(\mathbf{T}) \rangle_{R^K} / K, \quad (13)$$

$$E_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{E}_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(\mathbf{T}) \rangle_{R^K} / K, \quad (14)$$

де $\mathbf{E}_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(\mathbf{T}) = \{E_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(T_k)\}_{k=1}^K$, $\mathbf{E}_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(\mathbf{T}) = \{E_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(T_k)\}_{k=1}^K$. Із послідовним збільшенням T^K значення $E_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(T^K)$ та $E_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(T^K)$ дозволяють відстежувати динаміку зміни якості оброблення сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ у вузлах та проходження ними ребер, розміщених на лінії $[S_0, S_N]$. Якщо узагальнена оцінка $E_{\mathbf{P}}(S_i, T^K)$ вузла S_i за період T^K значно менша від $E_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(T^K)$, то можна зробити обґрунтований висновок про наявність істотних недоліків у стані його інфраструктури або організації роботи. Аналогічно, якщо узагальнена оцінка $E_{\mathbf{P}}(D_i, T^K)$ ребра D_i за період T^K значно нижча від $E_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(T^K)$, то можна зробити обґрунтований висновок про наявність у його стані істотних недоліків. Такі висновки є ваговою підставою для позапланової перевірки стану чи якості функціонування відповідних об'єктів системи.

Інтерактивне оцінювання ліній СІМС. Вище при узагальненні оцінок для вузлів та ребер мережевої структури їх виділяли, як для об'єктів великої складної динамічної системи різних типів. Агрегована оцінка проходження сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ лінією $[S_0, S_N]$ загалом протягом періоду T_k визначається за співвідношенням

$$E_{\mathbf{P}}(T_k) = (\rho_{\mathbf{S}} E_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(T_k) + \rho_{\mathbf{D}} E_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(T_k)) / (\rho_{\mathbf{S}} + \rho_{\mathbf{D}}), \quad k = \overline{1, K}, \quad (15)$$

де $E_{\mathbf{P},\mathbf{S}}(T_k)$, $E_{\mathbf{P},\mathbf{D}}(T_k)$ визначені у (11), (12), і $\rho_{\mathbf{S}}$, $\rho_{\mathbf{D}}$ — вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність сукупностей вузлів та ребер, які утворюють

лінію, під час оцінювання. Так, після ремонту колії та відповідного періоду стабілізації більша увага природно приділяється аналізу стану та ефективності роботи станцій. Аналіз останньої послідовності дає змогу виявляти циклічні зміни якості оброблення сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ на лінії $[S_0, S_N]$ загалом.

Усереднену оцінку проходження сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ лінією $[S_0, S_N]$ протягом часового інтервалу T^K визначаємо за співвідношенням

$$E_P(T^K) = \langle \mathbf{1}, \mathbf{E}_P(\mathbf{T}) \rangle_{R^K} / K, \quad (16)$$

де $\mathbf{E}_P(\mathbf{T}) = \{E_P(T_k)\}_{k=1}^K$. Із послідовним збільшенням T^K значення $E_P(T^K)$ дозволяють відстежувати динаміку зміни якості оброблення сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ на лінії $[S_0, S_N]$. Якщо узагальнена оцінка окремого потоку $E(P_j, T^K)$ значно нижча, ніж $E_P(T^K)$, то можна зробити обґрунтований висновок про можливий його незадовільний стан або необхідність зміни графіка руху.

Стосовно об'єктів ЗТС оцінки (11)–(14) дають змогу формувати узагальнені висновки про проходження сукупності потягів станціями та міжстанційними перегонами лінії за визначений період або тривалі проміжки часу, що дозволяє виявляти незадовільно функціонуючі об'єкти залізниці, оцінки (15)–(16) — аналізувати стан та ефективність організації руху потягів на лінії загалом.

Якщо для сукупності потоків, які проходять лінією протягом часового інтервалу T^K , затримки в основному компенсуються у вузлах, то це є опосередкованим, хоча й достатньо показовим свідченням стану потоку або стану ребра. З іншого боку, якщо затримки загалом компенсуються на ребрах, то це свідчить про стан інфраструктури або ефективність роботи вузлів. Якщо ж узагальнена оцінка компенсацій, яка є свідченням їх масовості, є нижчою за агреговану оцінку об'єктів СІМС, які утворюють лінію, то можна зробити обґрунтований висновок про те, що встановлений на ній графік руху потоків є неоптимальним або чутливим до малих затримок. Загалом, відстежуючи динаміку поведінки агрегованих інтерактивних оцінок усіх рівнів, із послідовним збільшенням значення T^K можна визначати тренди зміни стану та якості функціонування відповідних об'єктів СІМС. При цьому короткострокове прогнозування, отримане внаслідок екстраполяції інтерактивних оцінок на підставі відомої передісторії їх значень, дає змогу завчасно виявляти ті об'єкти, які у найближчій перспективі можуть перейти «поріг безпеки», а отже, потребують позапланового дослідження та відповідних дій. Довгострокове прогнозування інтерактивних оцінок, здійснене, наприклад, за допомогою апарату часових рядів, дозволяє відстежувати сезонні зміни у поведінці основних структурних елементів СІМС та запобігати негативним тенденціям їх розвитку [17].

ВИСНОВКИ

У працях [1–3] і цій роботі запропоновано методика комплексного детермінованого оцінювання складних систем з ієрархічно-мережевою структурою, складовими якої є методи локального, прогностичного, інтерактивного та агрегованого оцінювання їх основних об'єктів. Показано, що у поєднанні та із застосуванням уточненої бальної шкали оцінок вони формують достатньо повне, адекватне і цілісне уявлення про стан, якість функціонування та взаємодію елементів досліджуваної системи та її підсистем на всіх рівнях структуризації. Розроблені принципи відображення результатів оцінювання різних типів та рівнів узагальнення дають можливість оперативно орієнтуватися у великій кількості отриманих висновків та локалізувати причини виявлених недоліків. Описана методика використовується під час розроблення програмного забезпечення для оцінювання стану і якості функціонування колійного та станційного господарства Укрзалізниці [18; 19]. Окремі її методи та способи візуалізації результатів застосовувались для оцінювання якості протезування нижніх кінцівок інвалідів та рівня відновлення функціональних можливостей опорно-рухового апарату людини за різних типів патології та методик реабілітації [20; 21]. Описана методика адаптується для оцінювання мережових систем із частково впорядкованим рухом потоків, до яких належать, зокрема, автотранспортні системи великих міст та регіонів країни [11]. Можливість її застосування для аналізу стану та якості функціонування систем різного типу і призначення є свідченням універсальності запропонованого підходу для оцінювання складних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Поліщук Д.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережових систем: I. Опис методики / Д. Поліщук, О. Поліщук, М. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 1. — С. 21–31.
2. *Поліщук Д.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережових систем: II. Локальне та прогностичне оцінювання / Д. Поліщук, О. Поліщук, М. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 2. — С. 26–38.
3. *Поліщук Д.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережових систем: III. Агреговане оцінювання / Д. Поліщук, О. Поліщук, М. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 4. — С. 21–30.
4. *Lichtberger B.W.* Kostensenkung durch qualitätsvorrat in der fahrweginstandhaltung / B.W. Lichtberger // Der Eisenbahningenieur. — 1999. — 50, № 1. — P. 39–42.
5. *Alles M.* Continuous monitoring of business process controls: a pilot implementation of a continuous auditing system at siemens / M. Alles, G. Brennan, A. Kogan, M.A. Vasarhelyi // International Journal of Accounting Information Systems. — 2006. — 7. — № 2. — P. 137–161.
6. *Kacira M.* Design and development of an automated and non-contact sensing system for continuous monitoring of plant health and growth / M. Kacira, P. Ling // ASAE Transactions. — 2001. — 44(4). — P. 989–996.
7. *Shen Q.* Selecting informative features with fuzzy-rough sets and its application for complex systems monitoring / Q. Shen, R. Jensen // Pattern Recognition. — 2004. — 37, № 7. — P. 1351–1363.

8. Zhao F. Monitoring and fault diagnosis of hybrid systems / F. Zhao, X. Koutsoukos, H. Haussecker, J. Reich, P. Cheung // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 2007. — 35, № 6. — P. 1225–1240.
9. Balageas D. Structural health monitoring / D. Balageas. — 2010. — DOI: 10.1002/9780470612071.ch1.
10. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков / В.И. Швецов // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 11. — С. 3–46.
11. Поліщук Д.О. Моніторинг потоку транспортних мереж із частково впорядкованим рухом / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук // Зб. наук. праць ХХІІІ наук.-техн. конф. молодих науковців Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ (23–25 жовт., 2013 р.). — Львів, Україна. — С. 326–329.
12. Бакаев А.А. Международные транспортные коридоры Украины: сети и моделирование. Том 1. Наземные виды транспорта / А.А. Бакаев. — К.: КУЭТТ, 2003. — 516 с.
13. Lung-Wen T. Distributed real time systems: monitoring, visualization, debugging and analysis / T. Lung-Wen. — Lavoisier, 1996. — 336 p.
14. Bloom M. Evaluating practice / M. Bloom, J. Fischer, J. Orme // Allyn and Bacon, 2006. — 488 p.
15. Novorka R. Continuous glucose monitoring and closed-loop systems / R. Novorka // Diabetic Medicine. — 2006. — 23, № 1. — P. 1–12.
16. Marakas G.M. Decision support systems in the 21st Century / G.M. Marakas. — Pearson Education, 2003. — 638 p.
17. Поліщук Д.О. Використання часових рядів для прогнозування оцінки якості функціонування складних систем / Д. Поліщук, М. Яджак // Зб. праць Міжнар. наук. конф. «Сучасні проблеми механіки і математики» (Львів, 25–29 трав. 2008 р.). — Т. 3. — С. 38–40.
18. Поліщук Д.О. Модель локального оцінювання стану елементів колійного господарства Укрзалізниці / Д.О. Поліщук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — 2012. — Вип. 41. — С. 158–166.
19. Поліщук Д.О. Модель локального оцінювання станційного господарства Укрзалізниці / Д.О. Поліщук // Зб. наук. праць IV конф. молодих учених із сучасних проблем механіки і математики (Львів, 24–27 трав. 2011 р.). — С. 178–181.
20. Polishchuk D. Solution of some problems of evaluation of the complex systems / D. Polishchuk, O. Polishchuk, M. Yadzhak // Proc. of the 15th Int. conf. on automatic control (23–26 September, 2008). — Odesa: ONMA. — P. 968–976.
21. Polishchuk O. Optimization of estimation of man's musculoskeletal system / O. Polishchuk // Computer Mathematics and Calculation Optimization. — 2001. — 2. — P. 360–367.

Надійшла 28.05.2013