

**МЕРЕЖЕВІ СТРУКТУРИ ТА СИСТЕМИ:  
IV. ПАРАЛЕЛЬНЕ ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ  
НЕПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ**

**О.Д. ПОЛІЩУК, М.С. ЯДЖАК**

**Анотація.** Формалізовано процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів складних ієрархічно-мережевих систем. Для ефективної реалізації цієї процедури на багатоядерних комп'ютерах і кластерах запропоновано відповідні алгоритмічні конструкції, що виявляють перспективи розпаралелювання та враховують обмеженість можливостей обчислювальних ресурсів. Наведено оцінки складності та прискорення паралельних обчислень, які підтверджують високу ефективність використання запропонованих конструкцій. Отримані результати можуть бути застосовані для оцінювання в режимі реального часу з використанням сучасних програмних засобів багатьох складних систем, стан та поведінка яких неперервно змінюються у часі, зокрема транспортних систем, систем енерго- та життєзабезпечення, банківських і торговельних мереж, екосистем окремих регіонів тощо.

**Ключові слова:** мережева система, ієрархія, неперервний моніторинг, інтерактивне оцінювання, розпаралелювання, обчислювальне середовище, прискорення обчислень.

**ВСТУП**

Методи теорії оцінювання є потужним інструментом для аналізу стану та ефективності функціонування складних систем різного типу та призначення [1–3]. У працях [4–7] запропоновано методіку комплексного детермінованого оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС), яка полягає у поєднанні методів локального, прогностичного, агрегованого та інтерактивного аналізу стану, якості функціонування та взаємодії елементів таких систем. Величезні обсяги даних, які описують поведінку реальних СІМС, потребують розроблення ефективних методів їх оброблення. У працях [8, 9] запропоновано алгоритми розпаралелювання методів локального та агрегованого оцінювання СІМС, а у [10] подано загальну схему розпаралелювання комплексної методіки регулярних (планових) оцінювань [11] системи. Не менш важливою є проблема оперативного оброблення та аналізу даних, які надходять у процесі неперервного моніторингу системи. Ця проблема достатньо ефективно вирішується методами інтерактивного оцінювання, детально описаними у праці [7]. У більшості випадків її доцільно

вирішувати в режимі реального часу, тому потрібно виявляти та залучати можливості паралельних обчислень. Зауважимо, що вхідні дані, які надходять у процесі неперервного моніторингу системи в центр(и) оброблення, можуть бути дещо спотвореними внаслідок певних пошкоджень на етапі передавання або похибок вимірювань (реєстрації). Тому для подальшого використання цих даних у методах інтерактивного оцінювання їх потрібно попередньо відфільтрувати, щоб усунути проблемні фрагменти. У зв'язку з цим побудовано й обґрунтовано низку високопаралельних алгоритмів цифрової фільтрації, орієнтованих на різні типи архітектур обчислювальних засобів спеціального (систолічні і квазісистолічні структури [12]) та універсального (засоби зі структурно-процедурною організацією обчислень [13], багатоядерні комп'ютери, кластери, гібридні архітектури, високопродуктивні обчислювальні середовища [14] тощо) призначення.

**Мета роботи** — розпаралелювання методів інтерактивного оцінювання СІМС і побудова відповідних алгоритмічних конструкцій для ефективної їх реалізації на підставі використання сучасних програмних та апаратних засобів.

## НЕПЕРЕРВНИЙ МОНІТОРИНГ ТА ІНТЕРАКТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ

Однією з визначальних особливостей реальних мережеских та ієрархічно-мережеских систем є рух потоків у них. В одних випадках забезпечення руху потоків є основною метою утворення та функціонування таких систем (транспортних, систем ресурсопостачання, торговельних та інформаційних мереж тощо), у інших — основним процесом, який забезпечує їх життєдіяльність (рух крові, лімфи, нейроімпульсів у людському тілі, сезонну міграцію тварин і т. ін.). Затримка або зупинення руху потоків може призвести до збоїв або припинення існування таких систем. Часто проводити планові дослідження системи немає змоги через значні матеріальні та фінансові витрати [4, 11]. Це означає, що стан або якість функціонування системи, для якої під час останнього регулярного огляду отримано позитивні висновки, можуть перетнути «поріг безпеки» до моменту наступного планового дослідження. Окрім того, існують системи, неперервний моніторинг стану та процесу функціонування яких є обов'язковою умовою забезпечення нормальної життєдіяльності або самої системи (люди, що хворіють на діабет або гіпертонію), або оточуючого середовища (шкідливі та небезпечні виробництва, атомні електростанції тощо). Запропоновані у працях [7, 11] методи інтерактивного оцінювання дозволяють оперативно опрацьовувати результати неперервного моніторингу та привертати увагу до найбільш проблемних елементів системи, які створюють реальну загрозу для її подальшого функціонування. Застосування цих методів дає об'єктивні підстави для пришвидшення або відтермінування наступного планового оцінювання елементів системи та впорядковує цей процес. Це особливо актуально для великих СІМС, оскільки одночасне ретельне дослідження багатьох елементів системи часто є фізично неможливим.

Інтерактивне оцінювання здійснюється на рівні аналізу взаємодії таких об'єктів СІМС, як потоки  $P_j$ ,  $j = \overline{1, M}$  і лінія  $[S_0, S_N]$ , що є послідовністю вузлів  $S_i$  та ребер  $D_i = (S_{i-1}, S_i)$ ,  $i = \overline{1, N}$ , які їх з'єднують. Тут  $M$  — кіль-

кість потоків, які проходять лінією за певний проміжок часу. Вважаємо, що проходження потоків є повністю детермінованим, тобто визначено графік їх руху. Для спрощення подальшого викладу вважаємо, що відправлення потоку з вузла  $S_0$  відбувається без затримок.

Затримка потоку на ребрі може бути спричинена [7] такими обставинами, як незадовільний стан ребра, незадовільний стан потоку, неготовність вузла до приймання потоку тощо. Лише перша обставина стосується безпосередньо стану ребра. Затримка потоку у вузлі може бути спричинена 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, лише перша обставина стосується безпосередньо організації роботи вузла. Із проходженням потоків по лінії вплив наведених чинників може послідовно нагромаджуватися та компенсуватися. Деякі з них мають випадковий характер, а деякі можуть бути регулярними. Нерегулярні збої породжують суттєві проблеми у процесі функціонування СІМС лише у разі їх масовості і потребують розроблення спеціальних методів аналізу їх виникнення. Наприклад, такі збої можливі під час запровадження нових великих онлайн-сервісів через недостатню потужність обладнання, слабку захищеність від комп'ютерних вірусів, неякісне програмне забезпечення, яке підтримує процес їх функціонування тощо. Основною метою інтерактивного оцінювання є виявлення і локалізація саме регулярних негативних факторів, які зумовлюють відхилення від установленого графіка руху потоків.

#### ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ІНТЕРАКТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Формально процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС можна подати як послідовність таких кроків [7].

1. Обчислення локальних оцінок  $e(P_j, S_i, T_k)$  якості оброблення потоку  $P_j$  у вузлі  $S_i$  та  $e(P_j, D_i, T_k)$  якості проходження потоком  $P_j$  ребра  $D_i$  за період  $T_k$  тривалістю  $T^0$  для  $j = \overline{1, M}$ ;  $i = \overline{1, N}$ ;  $k = \overline{1, K}$ .

2. Побудова на підставі локального оцінювання оцінок першого рівня узагальнення, а саме:

а) оцінок  $E(P_j, S_i, T^K)$  вузла  $S_i$  та  $E(P_j, D_i, T^K)$  ребра  $D_i$  за результатами оброблення потоку  $P_j$  протягом періоду  $T^K$ , де  $T^K = KT^0$ , для  $j = \overline{1, M}$ ;  $i = \overline{1, N}$ ;

б) оцінок  $E_{\mathbf{P}}(S_i, T_k)$  вузла  $S_i$  та  $E_{\mathbf{P}}(D_i, T_k)$  ребра  $D_i$  за результатами проходження сукупності потоків  $\mathbf{P} = \{P_j\}_{j=1}^M$  протягом періоду  $T_k$  для  $i = \overline{1, N}$ ;  $k = \overline{1, K}$ ;

в) оцінок  $E_{\mathbf{S}}(P_j, T_k)$  оброблення потоку  $P_j$  у послідовності вузлів  $\mathbf{S} = \{S_i\}_{i=1}^N$  та  $E_{\mathbf{D}}(P_j, T_k)$  проходження потоку ребрами  $\mathbf{D} = \{D_i\}_{i=1}^N$ , що розміщені на лінії, протягом періоду  $T_k$  для  $j = \overline{1, M}$ ;  $k = \overline{1, K}$ .

3. Обчислення на підставі оцінок першого рівня оцінок другого рівня узагальнення, зокрема:

а) оцінок  $E_S(P_j, T^K)$  оброблення потоку  $P_j$  у послідовності вузлів  $S$  та  $E_D(P_j, T^K)$  проходження потоку ребрами  $D$ , які розміщені на лінії, протягом періоду  $T^K$  для  $j = \overline{1, M}$ ;

б) оцінок  $E_P(S_i, T^K)$  вузла  $S_i$  та  $E_P(D_i, T^K)$  ребра  $D_i$  за результатами проходження сукупності потоків  $P$  протягом періоду  $T^K$  для  $i = \overline{1, N}$ ;

в) оцінок  $E_{P, S}(T_k)$  оброблення сукупності потоків  $P$  у послідовності вузлів  $S$  та  $E_{P, D}(T_k)$  проходження цих потоків послідовністю ребер  $D$ , розміщених на лінії, за період  $T_k$  для  $k = \overline{1, K}$ .

4. Побудова на підставі оцінок другого рівня оцінок третього рівня узагальнення, а саме:

а) оцінок  $E_{P, S}(T^K)$  оброблення сукупності потоків  $P$  у послідовності вузлів  $S$  та  $E_{P, D}(T^K)$  проходження потоками ребер  $D$ , розміщених на лінії, протягом періоду  $T^K$ ;

б) агрегованих оцінок  $E_P(T_k)$  проходження сукупності потоків  $P$  лінією протягом періоду  $T_k$  для  $k = \overline{1, K}$ .

5. Обчислення на підставі агрегованих оцінок третього рівня узагальнення усередненої оцінки четвертого рівня  $E_P(T^K)$  проходження сукупності потоків  $P$  лінією протягом періоду  $T^K$ .

Детальний аналіз наведеної вище процедури інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС дозволяє зробити такі висновки про підходи до її можливого виконання:

- усі оцінки в межах кожного з пунктів 1–4 можуть бути обчислені одночасно, тобто паралельно;
- оцінки кожного з пунктів 2–5 є оцінками певного рівня узагальнення, при цьому оцінки вищого рівня будуються на підставі оцінок нижчого рівня узагальнення; отже, можемо говорити про паралельно-послідовний спосіб оброблення даних;
- безпосереднє обчислення самих оцінок ґрунтується на виконанні векторних операцій;
- процедура оцінювання є сукупністю із 5 фрагментів з різним ступенем паралелізму, тому для попереднього оцінювання паралельних обчислень слід використовувати таку характеристику, як середній ступінь паралелізму;
- реалізація процедури оцінювання може бути доволі ефективною на сучасних векторно-конвеєрних обчислювальних системах, які мають ієрархічну структуру і натеper є одним з найпотужніших (хоча і дорогих) обчислювальних засобів, а також на кластерах і багатоядерних комп'ютерах.

Очевидно, що залежно від конкретної мети оцінювання та типу досліджуваної складної системи може реалізовуватись не вся описана вище про-

цедура, а лише окремі її кроки або деякі фрагменти цих кроків. У цій роботі розглянемо особливості паралельної реалізації всієї наведеної вище процедури інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС.

### АЛГОРИТМІЧНІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Для виконання описаної вище процедури інтерактивного оцінювання СІМС розглянемо алгоритмічні конструкції організації паралельних обчислень у разі, коли немає обмежень на обсяг (кількість ядер, процесорних елементів, обчислювальних вузлів; ємність оперативної пам'яті вузла) обчислювальних ресурсів і коли такі обмеження є суттєвими. У першому випадку зможемо виявити й оцінити потенційний паралелізм операцій у процедурі оцінювання, а в другому випадку — більш ретельно підійти до реалізації згаданої процедури на конкретному паралельному комп'ютері з наперед визначеним обсягом обчислювальних ресурсів. Для задання паралельних гілок будемо використовувати примітиви *fork*, *join* (розгалуження, злиття) [9, 15]. У разі відсутності обмежень на обсяг обчислювальних ресурсів пропонується алгоритмічна конструкція для виконання процедури інтерактивного оцінювання складається з чотирьох паралельних фрагментів і має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 & \text{fork } (h_1^0, h_2^0, \dots, h_{l_0}^0) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (h_1^1, h_2^1, \dots, h_{l_1}^1) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (h_1^2, h_2^2, \dots, h_{l_2}^2) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (h_1^3, h_2^3, \dots, h_{l_3}^3) \text{ join,} \\
 & \quad h^4,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $h_i^0, i'=\overline{1, l_0}$ ;  $h_j^1, j'=\overline{1, l_1}$ ;  $h_k^2, k'=\overline{1, l_2}$ ;  $h_{l'}^3, l'=\overline{1, l_3}$  — паралельні гілки, у яких обчислюються відповідно локальні оцінки та оцінки першого, другого і третього рівнів узагальнення;  $h^4$  — фрагмент, у якому обчислюється оцінка четвертого рівня узагальнення  $E_{\mathbf{P}}(T^K)$ ;  $l_0 = 2MNK$ ;  $l_1 = 2(M(N + K) + NK)$ ;  $l_2 = 2(M + N + 2K)$ ;  $l_3 = K + 2$ .

Згідно з працею [7] кожна з локальних оцінок  $e(P_j, S_i, T_k)$ ,  $e(P_j, D_i, T_k)$ ,  $j = \overline{1, M}$ ;  $i = \overline{1, N}$ ;  $k = \overline{1, K}$  може набувати за уточненою більшою шкалою одне із чотирьох значень, які можна обчислювати одночасно. Тоді для реалізації обчислень у кожній з гілок  $h_i^0, i'=\overline{1, l_0}$  потрібно виконати щонайбільше 8 арифметичних операцій (7 операцій додавання і 1 операцію ділення).

Обчислення оцінок першого рівня узагальнення  $E(P_j, S_i, T^K)$ ,  $E(P_j, D_i, T^K)$ ; оцінок другого рівня узагальнення  $E_{\mathbf{S}}(P_j, T^K)$ ,  $E_{\mathbf{D}}(P_j, T^K)$ ,  $E_{\mathbf{P}}(S_i, T^K)$ ,  $E_{\mathbf{P}}(D_i, T^K)$  для  $j = \overline{1, M}$ ;  $i = \overline{1, N}$ ; оцінок третього рівня уза-

гальнення  $E_{P,S}(T^K), E_{P,D}(T^K)$  та оцінок четвертого рівня узагальнення  $E_P(T^K)$  потребує виконання  $K$  арифметичних операцій (( $K-1$ ) операцію додавання та 1 операцію ділення).

Також встановлено, що для обчислення оцінок першого рівня узагальнення  $E_P(S_i, T_k), E_P(D_i, T_k), E_S(P_j, T_k), E_D(P_j, T_k)$  та оцінок другого рівня узагальнення  $E_{P,S}(T_k), E_{P,D}(T_k)$  для  $i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}; k = \overline{1, K}$  необхідно виконати  $3M-1$  арифметичну операцію ( $M$  операцій множення,  $2(M-1)$  операцій додавання та 1 операцію ділення). Тут слід зауважити, що для обчислення оцінок  $E_{P,S}(T_k), E_{P,D}(T_k); k = \overline{1, K}$  пропонується й інший підхід [7], який потребує виконання  $3N-1$  арифметичну операцію ( $N$  операцій множення,  $2(N-1)$  операцій додавання та 1 операцію ділення).

Обчислення оцінок третього рівня узагальнення  $E_P(T_k), k = \overline{1, K}$  зводиться до виконання 5 арифметичних операцій (2 операцій множення, 2 операцій додавання та 1 операції ділення).

На підставі викладеного отримуємо, що загалом для реалізації конструкції (1) потрібно виконати

$$\max \{3M-1, K\} + \max \{3M-1, 3N-1, K\} + \max \{K, 5\} + K + 8 \quad (2)$$

паралельних операцій.

У разі послідовної реалізації описаної вище процедури інтерактивного оцінювання потрібно виконати

$$36MNK + 6M^2K + 6K(N+M) + 4K \quad (3)$$

арифметичних операцій.

Припустімо, що  $t_1, t_2, t_3$  — відповідно час виконання арифметичних операцій додавання, множення та ділення і при цьому зазвичай  $t_1 < t_2 < t_3$ . Використовуючи наведені оцінки складності обчислень (2) та (3) і поклавши  $M = N = K = L$  (для реальних СІМС  $L$  є доволі великим), отримуємо відповідно вирази для часу виконання процедури інтерактивного оцінювання у послідовному режимі та на підставі застосування паралельно-послідовного способу згідно з алгоритмічною конструкцією (1):

$$2L^3(17t_1 + 2(t_2 + t_3)) + 2L^2(t_1 + 2t_2 + 3t_3) + L(2t_2 - 7t_1 + 9t_3) + 3(t_3 - t_1);$$

$$2L(3t_1 + t_2) + t_1 - 5t_3.$$

Далі, вважаючи, що  $L$  є якзавгодно великим, отримуємо, що прискорення обчислень за (1) є близьким до значення

$$AL^2 + BL + C,$$

де

$$A = 2 + \frac{11t_1 + 2t_3}{3t_1 + t_2}; \quad B = 1 + \frac{3t_3 - 2t_1 + t_2}{3t_1 + t_2}; \quad C = 0,5 + \frac{4,5t_3 + 0,5t_2 - 5t_1}{3t_1 + t_2}.$$

Звідси випливає висновок, що за зроблених вище припущень стосовно часу виконання арифметичних операцій та  $M, N, K$  прискорення обчислень може вимірюватися десятками тисяч і більше разів.

Отже, алгоритмічна конструкція (1) дозволяє оцінити потенційні можливості розпаралелювання процедури інтерактивного оцінювання. Хоча загалом кожен із паралельних її фрагментів має різну кількість автономних гілок і в межах цих фрагментів гілки можуть мати різну складність, використання згаданої конструкції в окремих випадках дасть можливість значно прискорити обчислювальний процес на обчислювальних засобах як зі спільною, так і з розподіленою пам'яттю.

У разі обмеження обчислювальних ресурсів для реалізації процедури інтерактивного оцінювання на сучасних паралельних засобах можна скористатися конструкцією:

$$\begin{aligned}
 & \text{fork } (g_1^0, g_2^0, \dots, g_p^0) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (g_1^1, g_2^1, \dots, g_p^1) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (g_1^2, g_2^2, \dots, g_p^2) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (g_1^3, g_2^3, \dots, g_p^3) \text{ join,} \\
 & h^4,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де  $p$  — кількість паралельних гілок, які реально можна одночасно виконати на наявній обчислювальній системі;  $g_l^0, l = \overline{1, p}$  — паралельні гілки, у кожній з яких обчислюється  $l_0/p$  локальних оцінок;  $g_l^1, g_l^2, g_l^3; l = \overline{1, p}$  — паралельні гілки, у яких обчислюється відповідно  $l_1/p, l_2/p, l_3/p$  оцінок першого, другого і третього рівнів узагальнення. Тут вважається, що  $l_0, l_1, l_2, l_3 \in \text{кратними до } p$ . Обчислення оцінок згідно з конструкцією (4) можна організувати так, щоб гілки в межах кожного з паралельних фрагментів мали приблизно однакову складність.

Ураховуючи наведені вище формули для складності обчислення кожної оцінки, установимо час виконання кожного із чотирьох паралельних фрагментів  $U_0, U_1, U_2, U_3$  у конструкції (4), а, отже, і загальний час  $U$  реалізації усієї конструкції. Оскільки обчислення всіх локальних оцінок мають приблизно однакову складність, то звідси випливає, що час реалізації обчислень у кожній з гілок  $g_l^0, l = \overline{1, p}$  набуває значення

$$U_0 = 2MNK(12t_1 + 2t_3) / p.$$

Оцінки першого рівня загальності за складністю можна поділити на два типи. Обчислення оцінок окремого типу розподілимо між  $p$  гілками. Отже, для реалізації обчислень у кожній з гілок  $g_l^1, l = \overline{1, p}$  потрібен час:

$$U_1 = 2(MNK(3t_1 + t_2) + M^2K(2t_1 + t_2) + MN(t_3 - t_1) + (KN + KM)(t_3 - 2t_1)) / p.$$

Оцінки другого рівня узагальнення за складністю можна поділити на три типи. Аналогічно обчислення оцінок окремого типу розподілимо між  $p$  гілками. Унаслідок цього отримаємо час реалізації обчислень у кожній з гілок  $g_l^2, l = \overline{1, p}$ :

$$U_2 = 2((KN + KM)(3t_1 + t_2) + (M + N)(t_3 - t_1) + 2K(t_3 - 2t_1)) / p .$$

За складністю оцінки третього рівня узагальнення можна поділити на два типи. Обчислення  $K$  оцінок одного типу розподілимо між  $p$  гілками. Однак дві з цих гілок будуть найдовшими, оскільки в них ще обчислюватимуться по одній оцінці зі складністю  $K$ . Отже, для виконання обчислень у кожній з двох найдовших гілок з набору  $g_l^3, l = \overline{1, p}$  потрібен час:

$$U_3 = K((2(t_1 + t_2) + t_3) / p + t_1) + t_3 - t_1 .$$

У наведених вище формулах для часу вважається, що  $M, N, K$  є кратними до  $p$ .

Таким чином, обчислення згідно з конструкцією (4) будуть виконані за час:

$$U = 2(MNK(15t_1 + t_2 + 2t_3) + KM^2(2t_1 + t_2) + (KM + KN)(t_1 + t_2 + t_3) + (MN + M + N)(t_3 - t_1) + K(2,5t_3 + t_2 + (p - 3)t_1)) / p + 2(t_3 - t_1) . \quad (5)$$

Зауважимо, що у наведеній формулі враховано час  $U_4$  обчислень у фрагменті  $h^4$ :

$$U_4 = (K - 1)t_1 + t_3 .$$

На підставі формул (3) і (5) за умов  $M = N = K = L, L \gg p$ , для якзавгодно великого  $L$  отримуємо, що пришвидшення паралельних обчислень у даному разі є близьким до свого оптимального значення, тобто до  $p$ .

Отже, конструкція (4) дозволяє доволі ефективно реалізовувати методику інтерактивного оцінювання на наявних обчислювальних засобах зі спільною та розподіленою пам'яттю з наперед відомим (обмеженим) обсягом ресурсів.

Зауважимо, що певні резерви розпаралелювання містять і безпосередньо фрагменти обчислення оцінок, оскільки в них усюди використовується операція скалярного добутку векторів, яка ефективно реалізовується у системах на базі векторно-конвеєрних процесорів. Кластерні системи та системи зі спільною пам'яттю, побудовані на таких процесорах, натепер одні з найпродуктивніших у своєму класі, проте є доволі дорогими [16] обчислювальними засобами.

## ВИСНОВКИ

Ця робота є продовженням циклу робіт [11, 17, 18], у яких досліджуються мережеві структури та системи, а також низки робіт [8–10, 12–14, 19, 20], присвячених проблемам ефективного реалізації методики комплексного оцінювання СІМС на сучасних паралельних обчислювальних системах різної архітектури. Зокрема, формалізовано процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів таких систем у вигляді послідовності кроків. Наведено та досліджено алгоритмічні конструкції для паралельної реалізації цієї процедури. Отримані оцінки прискорення підтверджують їх високу ефективність.



Оскільки запропоновані конструкції є сукупністю фрагментів з автономних паралельних гілок, то їх реалізація на сучасних обчислювальних системах зі спільною (багатоядерні комп'ютери) та розподіленою (кластери, гібридні архітектури, високопродуктивні обчислювальні середовища) пам'яттю не викликає труднощів. Отримані в роботі результати можуть бути використані для оцінювання в режимі реального часу СІМС з різних предметних галузей, оскільки сама методика оцінювання є доволі універсальною. Указано деякі можливі шляхи подальшого прискорення обчислень під час реалізації процедури інтерактивного оцінювання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Owen C.L. Evaluation of complex systems / C.L. Owen // *Design Studies*. — 2007. — № 28, N 1. — P. 73–101.
2. Norros L. Usability evaluation of complex systems / L. Norros, P. Saviola // STUK, Helsinki, 2004. — 44 p.
3. Bar-Yam Y. About Engineering Complex Systems: Multiscale Analysis and Evolutionary Engineering. In: *Engineering Self-Organising Systems* / Ed. by Y. Bar-Yam // Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. — P. 16–31.
4. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: I. Опис методики / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 1. — С. 21–31.
5. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: II. Локальне та прогностичне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 2. — С. 26–38.
6. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: III. Агреговане оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 4. — С. 20–31.
7. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: IV. Інтерактивне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2016. — № 1. — С. 7–16.
8. Поліщук О.Д. Локальне оцінювання якості функціонування складних систем на підставі паралельних обчислень / О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник, М.С. Яджак // *Відбір і обробка інформації*. — 2010. — Вип. 32 (108). — С. 119–124.
9. Поліщук О.Д. Оцінювання якості функціонування складних систем на основі паралельної організації обчислень / О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник, М.С. Яджак // *Відбір і обробка інформації*. — 2007. — Вип. 26 (102). — С. 121–126.
10. Яджак М.С. Оптимізація методики комплексного оцінювання складних систем на підставі паралельних обчислень / М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник // *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. — 2016. — № 4. — С. 347–356.
11. Поліщук О.Д. Мережеві структури та системи: III. Ієрархії та мережі / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2018. — № 4. — С. 82–95.
12. Анисимов А.В. Построение оптимальных алгоритмов массовых вычислений в задачах цифровой фильтрации / А.В. Анисимов, М.С. Яджак // *Кибернетика и системный анализ*. — 2008. — № 4. — С. 3–14.

13. Яджак М.С. Оптимальный алгоритм решения задачи цифровой фильтрации с использованием адаптивного сглаживания / М.С. Яджак, М.И. Тютюнник // Кибернетика и системный анализ. — 2013. — № 3. — С. 142–151.
14. Яджак М.С. Паралельні алгоритми розв'язання просторової задачі цифрової фільтрації даних / М.С. Яджак // Інформатика та математичні методи в моделюванні. — 2017. — № 3. — С. 234–239.
15. Вальковский В.А. Распараллеливание алгоритмов и программ. Структурный подход / В.А. Вальковский. — М.: Радио и связь, 1989. — 176 с.
16. Рейтинговий список найпотужніших систем світу [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [www.top500.org](http://www.top500.org).
17. Поліщук О.Д. Мережеві структури та системи: I. Потоківі характеристики складних мереж / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 42–54.
18. Поліщук О.Д. Мережеві структури та системи: II. Серцевини мереж та мультиплексів / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 3. — С. 38–51.
19. Polishchuk O. Issues of Regional Development and Evaluation Problems / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Yadzhak, M. Tyutyunnyk // AASCIT Communications. — 2015. — 2, N 4. — P. 115–120.
20. Polishchuk O. Big Data Processing in Complex Hierarchical Network Systems / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Yadzhak, M. Tyutyunnyk // arXiv preprint arXiv: 1603.00633. — 2016. — 7 p.

Надійшла 18.09.2018