

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ НА ПІДСТАВІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України,
вул. Наукова, 3-Б, м. Львів, 79060, Україна; e-mail: yadzhak_ms@ukr.net

В роботі описана методика комплексного оцінювання стану та якості функціонування складних ієрархічно-мережевих систем. Для одержання адекватних оцінок вона залучає велику кількість характеристик та параметрів оцінювання, що загалом потребує виконання значних обсягів обчислень. Розроблено та досліджено підходи до оптимізації запропонованої методики оцінювання на підставі ефективної організації паралельних обчислень. Запропоновано алгоритмічні конструкції для реалізації методики комплексного оцінювання на сучасних та перспективних обчислювальних системах. Зазначено особливості такої реалізації на багатоядерних комп'ютерах, кластерних системах та у високопродуктивних обчислювальних середовищах. Наведено деякі теоретичні оцінки прискорення паралельних обчислень. Одержані в роботі результати можуть бути використані для комплексного оцінювання складних систем із багатьох предметних областей (транспортні системи, системи зв'язку та енергозабезпечення тощо) на підставі застосування сучасних програмних та апаратних засобів.

Ключові слова: складна система, ієрархічна структура, мережа, комплексне оцінювання, паралельний алгоритм, оптимізація, прискорення обчислень.

Вступ

Зараз використання паралельних обчислень є важливим фактором прискорення обчислювального процесу під час розв'язання алгоритмічно складних задач [1]. Для ефективної реалізації паралельних алгоритмів розвиваються, поширюються та стають загальнодоступними програмні (мови програмування високого рівня C, Fortran, Python, Go, Delphi, Java; сервіси паралельного програмування MPI, OpenMP, TBB, CSP, CUDA; бібліотеки виконання паралельних завдань тощо) та апаратні (багатоядерні комп'ютери, кластерні системи, прискорювачі NVIDIA GPUs, співпроцесори Intel Xeon Phi, розподілені обчислювальні середовища [2]) засоби. Головним напрямком об'єднання високопродуктивних обчислювальних систем в усьому світі та в Україні зокрема є створення та розвиток grid-інфраструктури [3]. Більшість обчислювальних систем, об'єднаних в grid, є кластерного типу. Останнім часом здійснюється їх модернізація шляхом переходу на процесори з більшою кількістю ядер, залучення графічних процесорів [4] і прискорювачів спеціалізованих обчислень та збільшення пропускну здатності комунікаційної мережі, що з'єднує обчислювальні вузли.

До алгоритмічно складних задач відносяться задачі оцінювання стану та якості функціонування складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС) [5]. У таких задачах для одержання адекватних оцінок використовується велика кількість характеристик та параметрів оцінювання, що загалом призводить до виконання значних обсягів обчислень. Окрім цього, оцінювання багатьох систем необхідно здійснювати у режимі

реального часу. Тому для розв'язання згаданих задач потрібно використовувати паралельні обчислення.

Раніше нами був запропонований паралельно-последовний підхід [6] для оптимізації (за часом) обчислень під час локального оцінювання якості функціонування складних динамічних систем. На підставі цього підходу запропоновано ефективні алгоритмічні конструкції для реалізації на паралельних системах зі спільною пам'яттю. У праці [7] розроблено та досліджено алгоритмічні конструкції для агрегованого оцінювання поведінки елемента системи, окремих підсистем та системи загалом. Ці конструкції зорієнтовані на виконання на паралельних обчислювальних системах зі спільною та розподіленою пам'яттю. Розроблені в [6, 7] підходи до організації паралельних обчислень дозволяють враховувати реальні апаратні можливості (кількість обчислювальних вузлів та ядер вузла, обсяг пам'яті вузла, продуктивність комунікаційної мережі тощо) наявної обчислювальної системи.

Метою цієї роботи є розробка підходів до розпаралелювання описаної в [8] методики комплексного оцінювання стану та якості функціонування СІМС, яка ґрунтується на різнобічному, багатокритеріальному та багаторівневому аналізі поведінки характеристик їх елементів та підсистем.

Складні ієрархічно-мережеві системи та особливості методики їх комплексного оцінювання

Розглядаємо СІМС як об'єкт, що складається із багатьох взаємопов'язаних між собою елементів різного типу та призначення, може реалізувати певну кількість різноманітних функцій, а його стан змінюється в часі [8]. При цьому функції системи є композицією функцій, які можуть реалізувати її елементи. Зазвичай елементи СІМС об'єднуються в підсистеми різного рівня складності та функціонального призначення, утворюючи ієрархічно-мережеву структуру. Особливість такої структури полягає в тому, що кожна підсистема певного рівня ієрархії поділяється на сукупність підсистем, які утворюють підмережу мережі нижчого рівня, тобто вона є сукупністю вузлів, поєднаних ребрами, по яких здійснюється рух потоків [8]. При цьому ребра повинні забезпечувати безперешкодне проходження потоку, а вузли – його обробку. Ієрархія вводиться на основі принципів побудови системи управління, просторового розміщення об'єктів системи тощо. Прикладами СІМС є великі промислові підприємства, банківські системи, торгівельні мережі, транспортні системи, системи зв'язку, постачання та життєзабезпечення тощо.

Очевидно, що із ієрархічності структури розглядуваної нами складної системи впливає потреба у багаторівневих оцінках: від локальних, які визначають стан та якість функціонування окремих елементів, до агрегованих, кожна з яких визначає стан або роботу окремих підсистем чи системи загалом. Для дослідження стану та якості функціонування СІМС розроблена методика [8–11], яка включає локальне, прогностичне, агреговане та інтерактивне оцінювання. Зауважимо, що згадана методика містить ще такі початкові етапи, як відбір первинних даних (характеристик елементів підсистем досліджуваної СІМС), їх опрацювання з метою усунення неточностей і шумів та кінцевий етап – візуалізацію результатів оцінювання. Ця методика адаптована до застосування на залізничній транспортній системі України [12, 13].

Під час локального оцінювання [9] досліджуються характеристики, що описують стан та функціонування елементів системи. Таке дослідження проводиться за певною кількістю параметрів та критеріїв, які визначаються особливостями характеристик елемента та метою оцінювання [14]. Для одержання локальних оцінок використовуються методи аналізу міри виходу значень характеристик за межі областей допустимих значень за двома параметрами. Зауважимо, що параметри, які ґрунтуються на рівномірній метриці, дозволяють відстежувати окремі «піки» та збурення у поведінці

досліджуваної характеристики та її похідних, а параметри, що ґрунтуються на середньоквадратичній метриці, дозволяють визначати узагальнене значення виходу характеристики за межі області допустимих значень. За кожним із параметрів формуються уточнені бальні оцінки поведінки відповідної характеристики [15].

Прогностичне оцінювання дозволяє прогнозувати стан та якість функціонування елементів або підсистем СІМС на коротко- та довгострокову перспективу [9]. Результати такого оцінювання характеристик елемента можуть розглядатися як складові локального оцінювання. При цьому прогнозуватися можуть як самі оцінки, так і поведінка характеристик елементів системи. Прогностичний аналіз уточнених оцінок дозволяє визначити момент часу, коли понятійна оцінка зменшиться на одиницю за того ж режиму експлуатації та за відсутності факторів, які можуть різко погіршити стан або якість функціонування елемента системи. Термін короткострокового прогнозу природно обмежувати часом наступного планового дослідження оцінюваних об'єктів. Процедура короткострокового прогностичного оцінювання поведінки характеристики елемента полягає у прогнозуванні її поточкових значень та здійснюється за допомогою екстраполяційного підходу. Її доцільно проводити лише для тих характеристик, для яких одержано негативний прогноз оцінки на момент наступного планового дослідження. Це дозволяє завчасно усунути потенційні ризики стану або процесу функціонування елемента системи. Для довгострокового прогнозування, до якого залучають декілька періодів планових досліджень та удосконалення після них об'єктів системи, використовується апарат часових рядів.

Агреговане оцінювання здійснюється з метою узагальнення локальних оцінок, тобто одержання висновків про стан та якість функціонування підсистем різних рівнів ієрархії та системи загалом [10]. Ці висновки одержуються на підставі трьох підходів. Згідно з першим підходом якість системи визначається якістю її «найслабшого» елемента. Цей підхід використовується під час оцінювання СІМС, в яких збої в роботі елементів можуть призвести до виходу з ладу окремих підсистем або всієї системи загалом. За другим підходом узагальнений висновок одержується за допомогою зваженої лінійної агрегації оцінок елементів з урахуванням їхньої пріоритетності. Пріоритетність визначається відповідними ваговими коефіцієнтами, які можуть бути наперед заданими (відомими) для об'єктів досліджуваної СІМС, легко встановлюватися, виходячи з особливостей системи та мети оцінювання, а також можуть формуватися на підставі залучення (опитування) експертів із відповідної предметної області унаслідок використання розроблених програмних засобів [16]. Основним недоліком цього підходу є нівелювання як позитивних, так і негативних оцінок. Більш адекватний до дійсності результат одержується на підставі третього підходу, який використовує нелінійну агрегацію. Головним недоліком, який суттєво обмежує застосування цього підходу для оцінювання якості системи, є складність урахування пріоритетності об'єктів, які її утворюють. Враховуючи основні підходи, нами розроблено гібридний метод агрегації [17], який поєднує переваги методів зваженої лінійної та нелінійної агрегації. Встановлено, що цей метод дозволяє одержувати більш адекватні та обґрунтовані висновки про стан і якість функціонування системи та окремих її підсистем.

Інтерактивне оцінювання є ефективним засобом неперервного моніторингу процесу функціонування системи та дозволяє на підставі взаємодії окремих її елементів або підсистем вчасно виявити такі з них, стан та якість функціонування яких викликає серйозні застереження [11]. Методи такого оцінювання дозволяють вчасно (до наступного планового огляду) відстежувати об'єкти системи, стан яких наближається до «незадовільного», та оперативно реагувати на виявлені недоліки. Під час інтерактивного оцінювання будуються локальні та агреговані оцінки досліджуваних об'єктів. На підставі цих оцінок доцільно будувати прогностичні інтерактивні оцінки, що дозволяють вчасно виявити та усунути загрози, не передбачені прогнозом, здійсне-

ним на основі регулярних планових досліджень, своєчасно корегувати такий прогноз і терміни перевірки та удосконалення окремих об'єктів СІМС. Зауважимо, що оцінюваними об'єктами системи в даному разі є потоки, шляхи їх проходження мережею, а також окремі вузли та ребра мережі.

Зазначимо, що під час оцінювання результатів планових досліджень СІМС необхідно опрацювати досить великі обсяги даних, які надходять з багатьох джерел через задані проміжки часу, а під час оцінювання результатів неперервного моніторингу необхідно опрацювати великі обсяги даних, які надходять з меншої кількості джерел (порівняно з плановими дослідженнями) неперервним потоком.

Організація та способи реалізації паралельних обчислень

На підставі проведених попередніх досліджень [18] було зроблено висновок, що описана вище методика комплексного оцінювання стану та якості функціонування СІМС володіє значними резервами оптимізації за часом і може бути ефективно реалізована на сучасних обчислювальних системах суперкомп'ютерного класу [1, 3, 19], які стали більш доступними для використання. Тому нами запропоновано загальний підхід до оптимізації обчислень. Цей підхід передбачає виконання наступних кроків:

- відбір первинних даних, необхідних для оцінювання;
- попереднє опрацювання в режимі реального часу первинних даних;
- розпаралелювання обчислень безпосередньо під час оцінювання;
- зрозумілу кінцевому користувачу візуалізацію результатів оцінювання.

Перший крок полягає в забезпеченні високої швидкості поступлення первинних даних шляхом використання новітніх технічних та програмних засобів, які здійснюють їх відбір, та комунікаційних технологій.

Для реалізації другого кроку нами запропоновано низку високопаралельних алгоритмів цифрової фільтрації даних [20]. Ці алгоритми орієнтовані на реалізацію на квазісистолічних структурах, які можна розглядати як потенційні прискорювачі спеціалізованих обчислень для кластерних систем.

Третій крок є найбільш ємким і включає одночасне (паралельне) виконання блоків із таких сукупностей:

1. Локальне оцінювання поведінки n характеристик, що описують стан елементів системи (блоки $X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s$);
2. Локальне оцінювання поведінки m характеристик, що описують функціонування елементів системи (блоки $X_1^f, X_2^f, \dots, X_m^f$);
3. Оцінювання стану r елементів системи (блоки $S_1^e, S_2^e, \dots, S_r^e$);
4. Оцінювання стану s підсистем СІМС (блоки $S_1^p, S_2^p, \dots, S_s^p$);
5. Оцінювання якості функціонування q елементів системи (блоки $F_1^e, F_2^e, \dots, F_q^e$);
6. Оцінювання якості функціонування u підсистем СІМС (блоки $F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p$);
7. Прогнозування поведінки n_0 поточкових значень характеристик елементів (блоки X_1, X_2, \dots, X_{n_0}), n_1 локальних (блоки L_1, L_2, \dots, L_{n_1}) і n_2 агрегованих (блоки A_1, A_2, \dots, A_{n_2}) оцінок різного ступеня загальності;
8. Інтерактивне оцінювання процесу функціонування v елементів системи (блоки $I_1^e, I_2^e, \dots, I_v^e$);

9. Інтерактивне оцінювання процесу функціонування w підсистем СІМС (блоки $I_1^p, I_2^p, \dots, I_w^p$);

10. Прогнозування m_0 інтерактивних оцінок (блоки I_1, I_2, \dots, I_{m_0});

11. Оцінювання стану (блок S), якості функціонування (блок F) та інтерактивне оцінювання (блок I) СІМС.

Залежно від типу складної системи та кінцевої мети оцінювання можуть розглядатися всі або лише деякі із наведених вище сукупностей блоків обчислень. При цьому в наборах 7 та 11 можуть розглядатися як усі блоки, так і лише деякі із них. Зауважимо, що для кожного із наведених вище наборів блоків обчислень здійснюється крупнозернисте (крупноблочне) розпаралелювання [21]. У цьому разі алгоритм обчислень є сукупністю загалом повністю автономних або слабозв'язаних паралельних гілок, кожна з яких має значний обсяг. Так, для набору блоків 1 такий алгоритм можна формально описати, використовуючи примітиви *fork*, *join* (галуження, злиття), за допомогою конструкції

$$\text{fork}(X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s) \text{ join} . \quad (1)$$

Для наборів 7 та 11 відповідні паралельні алгоритми обчислень можна описати за допомогою конструкцій

$$\text{fork}(X_1, X_2, \dots, X_{n_0}, L_1, L_2, \dots, L_{n_1}, A_1, A_2, \dots, A_{n_2}) \text{ join} \quad (2)$$

та

$$\text{fork}(S, F, I) \text{ join} . \quad (3)$$

Аналогічно можна записати алгоритмічні конструкції для паралельного виконання блоків решти наборів обчислень.

Зазначимо, що залежно від мети оцінювання окремі набори блоків можуть виконуватися одночасно, як, наприклад, 1 та 2; 3, 5 та 8 або 4, 6 та 9. Алгоритмічна конструкція паралельного виконання наборів 4, 6 та 9 блоків обчислень матиме вигляд:

$$\text{fork}(S_1^p, S_2^p, \dots, S_s^p, F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p, I_1^p, I_2^p, \dots, I_w^p) \text{ join} . \quad (4)$$

У разі, коли досліджувані підсистеми СІМС формуються виключно на базі оцінюваних елементів, описаних відповідними характеристиками, то набори 1, 3 та 4; 2, 5 та 6 або 8 та 9 блоків повинні виконуватись у послідовному режимі, а відповідна алгоритмічна конструкція для згаданої другої трійки наборів матиме вигляд:

$$\begin{aligned} &\text{fork}(X_1^f, X_2^f, \dots, X_m^f) \text{ join} , \\ &\text{fork}(F_1^e, F_2^e, \dots, F_q^e) \text{ join} , \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{fork}(F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p) \text{ join} .$$

Використання будь-якої із конструкцій (1)-(5) є найбільш ефективним у разі, коли обчислювальна складність блоків, які вона об'єднує, є приблизно однаковою. На практиці, під час дослідження реальних СІМС, ця умова ефективності може не завжди виконуватись. Тому на базі таких алгоритмічних конструкцій потрібно створювати нові шляхом об'єднання блоків з меншою обчислювальною складністю в один (декілька) нових блоків або ж формування абсолютно нових блоків обчислень.

Припустимо, що час виконання обчислень у кожному із блоків $X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s$ дорівнює відповідно t_1, t_2, \dots, t_n . Тоді для реалізації конструкції (1) потрібен час

$$t_{par}^{(1)} = \max\{t_1, t_2, \dots, t_n\}.$$

При цьому виконання згаданих блоків обчислень у послідовному режимі потребує часу

$$t_{seq}^{(1)} = t_1 + t_2 + \dots + t_n.$$

Отже, прискорення паралельних обчислень за (1) можна обчислити за формулою

$$S^{(1)} = (t_1 + t_2 + \dots + t_n) / \max\{t_1, t_2, \dots, t_n\}.$$

У разі, коли виконуються рівності

$$t_1 = t_2 = \dots = t_n = t_0,$$

отримуємо, що

$$S^{(1)} = nt_0 / t_0 = n.$$

Отже, у цьому випадку прискорення $S^{(1)}$ набуває свого оптимального значення. Тут вважаємо, що між блоками обмінів немає або їх кількість є незначною і вони не впливають на швидкість виконуваних обчислень. Аналогічні міркування можливі стосовно конструкцій (2)-(4).

Що ж стосується алгоритмічної конструкції (5), то слід зазначити, що оцінювання елементів та підсистем СІМС може здійснюватись на різних рівнях ієрархії і при цьому необхідно враховувати час, що витрачається на передачу результатів оцінювання елементів.

Вважаємо, що час виконання кожного із блоків $X_1^f, X_2^f, \dots, X_m^f$ дорівнює відповідно $\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_m$, блоків $F_1^e, F_2^e, \dots, F_q^e$ – відповідно $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_q$, а блоків $F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p$ – відповідно $\bar{\bar{t}}_1, \bar{\bar{t}}_2, \dots, \bar{\bar{t}}_u$. Тоді час виконання конструкції (5) складе

$$t_{par}^{(5)} = \max\{\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_m\} + \max\{\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_q\} + \max\{\bar{\bar{t}}_1, \bar{\bar{t}}_2, \dots, \bar{\bar{t}}_u\} + T_{com}^p,$$

де $T_{com}^p = \max\{T_{com}^1, T_{com}^2, \dots, T_{com}^q\}$, T_{com}^i – час передачі результату оцінювання i -го елемента.

Виконання згаданих блоків обчислень у послідовному режимі потребує часу

$$t_{seq}^{(5)} = (\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \dots + \tilde{t}_m) + (\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \dots + \bar{t}_q) + (\bar{\bar{t}}_1 + \bar{\bar{t}}_2 + \dots + \bar{\bar{t}}_u) + T_{com}^s.$$

Тут T_{com}^s – час передачі результату оцінювання елемента, що досліджується останнім. Вважаємо, що передача результатів оцінювання решти елементів є суміщена із власне оцінюванням кожного наступного елемента. Отже, прискорення паралельних обчислень за (5) можна обчислити за формулою

$$S^{(5)} = ((\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \dots + \tilde{t}_m) + (\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \dots + \bar{t}_q) + (\bar{\bar{t}}_1 + \bar{\bar{t}}_2 + \dots + \bar{\bar{t}}_u) + T_{com}^s) / (\max\{\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_m\} + \max\{\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_q\} + \max\{\bar{\bar{t}}_1, \bar{\bar{t}}_2, \dots, \bar{\bar{t}}_u\} + T_{com}^p).$$

Якщо ж виконуються рівності

$$\tilde{t}_1 = \tilde{t}_2 = \dots = \tilde{t}_m = \tilde{t}_0, \quad \bar{t}_1 = \bar{t}_2 = \dots = \bar{t}_q = \bar{t}_0 \quad \text{та} \quad \bar{\bar{t}}_1 = \bar{\bar{t}}_2 = \dots = \bar{\bar{t}}_u = \bar{\bar{t}}_0,$$

отримаємо, що

$$S^{(5)} = (m\tilde{t}_0 + q\bar{t}_0 + u\bar{\bar{t}}_0 + T_{com}^s) / (\tilde{t}_0 + \bar{t}_0 + \bar{\bar{t}}_0 + T_{com}^p).$$

У разі $\tilde{t}_0 = \bar{t}_0 = \bar{\bar{t}}_0 = t^*$ та $T_{com}^p = \alpha t^*$, $T_{com}^s = \beta t^*$, $\alpha, \beta \in R$ маємо таку формулу для прискорення:

$$S^{(5)} = (m + q + u + \beta)t^* / ((3 + \alpha)t^*) = (m + q + u + \beta) / (3 + \alpha).$$

Тобто, за умов $\alpha = \beta = 0$ прискорення $S^{(5)}$ набуває свого оптимального значення.

Зазначимо, що під час розроблення алгоритмічних конструкцій для дослідження об'єктів реальних СІМС потрібно зважати і на обсяг доступних обчислювальних ресурсів. В ідеальному випадку кількість паралельно виконуваних блоків обчислень (паралельних гілок) повинна дорівнювати кількості доступних процесорних елементів (ядер) або обчислювальних вузлів наявної паралельної системи. Лише за таких вимог до результуючих конструкцій можна очікувати, що їх реалізація на сучасних доступних обчислювальних засобах [22], буде доволі ефективною.

Поряд із одержанням адекватних кількісних оцінок для об'єктів СІМС не менш важливою є проблема візуалізації результатів оцінювання. Для її вирішення розроблено оригінальні підходи [9–11], які дозволяють побачити не лише кількісну, але й якісну картину. При цьому сама візуалізація може здійснюватись у режимі реального часу одночасно на деякій кількості моніторів, підключених до обчислювальної мережі або окремого її вузла. Отже, одночасно можна одержувати та аналізувати значну кількість якісної інформації про стан та якість функціонування елементів, підсистем та систем загалом.

Для подальшого зменшення часу обчислень є можливість їх розпаралелювання у межах кожного із виділених вище блоків X_i^s ($i = \overline{1, n}$), X_j^f ($j = \overline{1, m}$), S_k^e ($k = \overline{1, r}$), S_l^p ($l = \overline{1, s}$), F_m^e ($m' = \overline{1, q}$), F_n^p ($n' = \overline{1, u}$), $X_{i'}^e$ ($i' = \overline{1, n_0}$), $L_{j'}$ ($j' = \overline{1, n_1}$), A_k ($k' = \overline{1, n_2}$), $I_{l'}^e$ ($l' = \overline{1, v}$), $I_{j_1}^p$ ($j_1 = \overline{1, w}$), I_{j_2} ($j_2 = \overline{1, m_0}$), використовуючи підходи, детально описані у працях [6, 7].

Залежно від структури СІМС її дослідження можна проводити з допомогою розглянутих вище алгоритмічних конструкцій на різних обчислювальних засобах, починаючи від багатоядерних комп'ютерів і закінчуючи високопродуктивними обчислювальними середовищами. Для оцінювання низки систем (авто-, електротранспортна системи та системи газо-, водо- і енергопостачання міста, великі промислові підприємства тощо), елементи (підсистеми) яких розташовані територіально на незначній відстані один від одного, достатньо використати сучасні багатоядерні комп'ютери (декілька ядер працюють над спільною пам'яттю), підключені до локальної мережі, або ж кластери (декілька обчислювальних вузлів, з'єднаних високошвидкісною комунікаційною мережею, а пам'ять розподілена між ними). При цьому для кожної досліджуваної системи залежно від необхідного обсягу та структури виконуваних обчислень можна залучати засоби відповідної продуктивності та архітектури. Отже, такий підхід дозволяє проводити оптимізацію обчислювальних засобів під конкретну задачу (клас задач), тобто фактично зменшувати вартість оцінювання системи.

У разі, коли елементи (підсистеми) СІМС є територіально розташовані один від одного на значній (десятки, сотні та тисячі кілометрів) відстані (наприклад, залізнична

транспортна система та системи енерго- і газопостачання країни), тоді для ефективної реалізації методики комплексного оцінювання на базі запропонованих алгоритмічних конструкцій необхідно залучати (організовувати) високопродуктивне обчислювальне середовище. Загалом, таке середовище складається із територіально розподілених обчислювальних вузлів, з'єднаних комунікаційною мережею, і повністю відображає структуру (зазвичай ієрархічну) досліджуваної системи. Згадане середовище повинно володіти низкою таких властивостей: розподіленість, неоднорідність, динамічність, надійність, масштабність [2, 23]. Зауважимо, що під час використання високопродуктивного обчислювального середовища особлива увага приділяється забезпеченню належної пропускної здатності комунікаційної мережі. При цьому час, що витрачається на обміни, не повинен впливати на швидкість виконуваних обчислень. Найпростіше цього можна досягти, сумістивши виконання обчислювальних та обмінних операцій. У порівнянні з традиційним grid [3] обмін даними в такому середовищі та доступ до його ресурсів є доволі обмеженим і регламентується досить строгими правилами. Зазначимо, що в даному разі є можливість вибору оптимальних конфігурацій для вузлів обчислювального середовища та комунікаційної мережі, що суттєво зменшує вартість використовуваного обладнання, а, отже, і вартість процесу оцінювання СІМС.

Висновок

У роботі виділено основні характерні особливості складових методики комплексного оцінювання СІМС та розглянуто підходи до її оптимізації за часом на підставі ефективної організації паралельних обчислень. Запропоновано та досліджено алгоритмічні конструкції для виконання цієї методики або окремих її частин. Обговорено можливості реалізації згаданих конструкцій на сучасних і перспективних паралельних обчислювальних засобах. Наведено деякі оцінки прискорення паралельних обчислень. Одержані у даній роботі результати є доволі універсальними і можуть бути використані під час оцінювання стану та якості функціонування СІМС різних типів та призначення, зокрема, транспортних мереж, фінансових та банківських установ, торгівельних мереж, мереж життєзабезпечення окремих міст та цілих регіонів тощо. Запропоновано окремі способи здешевлення процесу оцінювання систем та їх об'єктів. Розроблені в роботі підходи до розпаралелювання методики комплексного оцінювання систем дозволяють використовувати для її реалізації не лише обчислювальні системи зі спільною (багатоядерні комп'ютери) та розподіленою (кластери, обчислювальні середовища) пам'яттю, але і засоби з гібридною архітектурою (кластери, що об'єднують багатоядерні системи, із залученням графічних [24], систолічних, квазісистолічних [25, 26] та інших процесорів для швидкого виконання спеціальних обчислень).

Подальші свої дослідження автори вбачають в адаптації запропонованих підходів для дослідження реальних складних систем і в розробці відповідних практичних рекомендацій стосовно можливостей доступних програмних та обсягу і архітектури використовуваних апаратних засобів.

Список літератури

1. Информационно-аналитический центр по параллельным вычислениям. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.parallel.ru.
2. Воеводин, Вл.В. Решение больших задач в распределённых вычислительных средах / Вл.В. Воеводин // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 5. – С. 32–45.
3. Український національний грід. Базовий координаційний центр. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: www.ung.in.ua.

4. Погорельий, С.Д. Анализ методов повышения производительности компьютеров с использованием графических процессоров и программно-аппаратной платформы CUDA / С.Д. Погорельий, Ю.В. Бойко, М.И. Трибрат, Д.Б. Грязнов // Математичні машини і системи. – 2010. – № 1. – С. 40–54.
5. Polishchuk, O. Big Data Processing in Complex Hierarchical Network Systems I: Structures and Information Flows / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Tyutyunnyk, M. Yadzhak // AASCIT Communications. – 2016. – Vol.3, № 3. – P. 112–118.
6. Поліщук, О.Д. Організація паралельних обчислень для локального оцінювання якості функціонування складних систем / О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник, М.С. Яджак // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 32 (108). – С. 119–124.
7. 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.
8. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина I. Опис методики / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 1. – С. 21–31.
9. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина II. Локальне та прогностичне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 2. – С. 26–38.
10. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина III. Агреговане оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 4. – С. 20–31.
11. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина IV. Інтерактивне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2016. – № 1. – С. 7–16.
12. Яджак, М.С. Дослідження стану та якості функціонування залізничної транспортної системи: I. Локальне, прогностичне та агреговане оцінювання / М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, Д.О. Поліщук // Вісник НТУ. – 2012. – Вип. 26. – С. 385–391.
13. Яджак, М.С. Дослідження стану та якості функціонування залізничної транспортної системи: II. Інтерактивне оцінювання / М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, Д.О. Поліщук // Вісник НТУ. – 2012. – Вип. 26. – С. 379–385.
14. Поліщук, Д.О. Порівняння методів оцінювання складних систем / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 32 (108). – С. 110–118.
15. Polishchuk, D. About Evaluation of Complex Dynamical Systems [Electronic resource] / D. Polishchuk, O. Polishchuk // Journal of Complex Systems. – 2013. – Article ID 204304, 6 p. – Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/204304>
16. Терендій, О.В. Інтелектуальна система збору інформації в вузькоспеціалізованій предметній області / О.В. Терендій, Р.А. Бунь // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України. – 2007. – Вип. 41. – С. 158–163.
17. Polishchuk, O. Aggregated evaluation of function quality of complex hierarchical network systems [Electronic resource] // arXiv preprint. – arXiv:1603.02317 [cs.SY]. – 9 Mar 2016. – 7p.
18. Поліщук, О.Д. Проблема оптимізації методики комплексного оцінювання стану та якості функціонування складних систем / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці міжнар. наук.-практ. конф., 12–15 травня 2015 р., м. Київ – м. Черкаси. – Черкаси, 2015. – С. 138–139.
19. Список найпотужніших обчислювальних систем світу. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.top500.org.
20. 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.
21. Вальковский, В.А. Распараллеливание алгоритмов и программ. Структурный подход / В.А. Вальковский. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
22. Клименко, В.П. Суперкомпьютеры: особенности современной модернизации / В.П. Клименко, Э.И. Комухаев // Математичні машини і системи. – 2010. – № 3. – С. 3–8.
23. Polishchuk, O. Big Data Processing in Complex Hierarchical Network Systems II: Computer Environments and Parallelization / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Tyutyunnyk, M. Yadzhak // AASCIT Communications. – 2016. – Vol. 3, № 3. – P. 119–124.
24. Якуба, А.А. Развитие ускорителей специализированных вычислений / А.А. Якуба, Э.И. Комухаев, С.Г. Рябчун // Математичні машини і системи. – 2010. – № 2. – С. 10–20.
25. Вальковский, В.А. Моделирование и реализация нейронных сетей на моделях параллельной обработки информации / В.А. Вальковский, М.С. Яджак // Теория и общие вопросы

- обработки аналоговой информации: Труды междунар. конф. «Методы и средства преобразования и обработки аналоговой информации», 8–10 июня 1999 г., г. Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ, 1999. – Т. 1. – С. 53–55.
26. Яджак, М.С. Об оптимальном в одном классе алгоритме решения трёхмерной задачи цифровой фильтрации / М. С. Яджак // Проблемы управления и информатики. – 2000. – № 6. – С. 66–81.

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВАНИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

М.С. Яджак, А.Д. Полищук, М.И. Тютюнник

Институт прикладных проблем механики и математики им. Я.С. Пидстригача НАН Украины, ул. Научная, 3-Б, г. Львов, 79060, Украина; e-mail: yadzhak_ms@ukr.net

В работе описана методика комплексного оценивания состояния и качества функционирования сложных иерархически-сетевых систем. Для получения адекватных оценок она использует большое количество характеристик и параметров оценивания, что в целом требует выполнения значительных объёмов вычислений. Поэтому разработаны и исследованы подходы к оптимизации предложенной методики оценивания на основании эффективной организации параллельных вычислений. Предложены алгоритмические конструкции для реализации методики комплексного оценивания на современных и перспективных вычислительных системах. Отмечены особенности такой реализации на многоядерных компьютерах, кластерных системах и в высокопроизводительных вычислительных средах. Приведены некоторые теоретические оценки ускорения параллельных вычислений. Полученные в работе результаты могут быть использованы для комплексного оценивания сложных систем из различных предметных областей (транспортные системы, системы связи и энергообеспечения и т. д.) на основании применения современных программных и аппаратных средств.

Ключевые слова: сложная система, иерархическая структура, сеть, комплексное оценивание, параллельный алгоритм, оптимизация, ускорение вычислений.

THE OPTIMIZATION OF METHODS OF COMPLEX EVALUATION FOR COMPLEX SYSTEMS ON THE BASE OF PARALLEL COMPUTATIONS

M.S. Yadzhak, O.D. Polishchuk, M.I. Tyutyunyk

Ya.S. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, NAS Ukraine, Naukova st., 3 b, L'vov, 79060, Ukraine; e-mail: yadzhak_ms@ukr.net

Methods of complex evaluation of the state and operation quality for complex hierarchical network systems are described in the paper. These methods are using a large number of characteristics and parameters of evaluations for obtaining the adequate conclusions. Such procedures require performance of huge amounts of computations. Therefore, approaches to the optimization of the proposed methods of evaluation based on the efficient organization of parallel computations are developed and investigated. Algorithmic constructions for the implementation of the methods of complex evaluation on the modern and perspective computer systems are offered. Features of this implementation on multi-core computers, cluster systems and high-performance computing environments are determined. Some theoretical estimates of the acceleration of parallel computing are presented. Results of this work can be used for complex evaluation of real hierarchical network systems from different subject areas (transport systems, communication and power supply systems etc.) based on the use of modern software and hardware.

Key words: complex system, hierarchical structure, network, complex evaluation, parallel algorithm, optimization, computing acceleration.