

Побудова паралельних алгоритмів дослідження об'єктів складних систем з ієрархічно-мережевою структурою

Михайло Яджак¹, Марія Тютюнник²

¹ Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3-Б, м. Львів, 79060, Україна, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, 79000, Україна, e-mail: yadzhak_ms@ukr.net

² Кандидат технічних наук, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3-Б, м. Львів, 79060, Україна, e-mail: tyutmi@ukr.net

Формалізовано процедуру комплексного оцінювання об'єктів складних систем, які мають ієрархічно-мережеву структуру. З метою реалізації цієї процедури в режимі реального часу запропоновано паралельні алгоритми обчислень. Для згаданих алгоритмів одержано оцінки прискорення, які підтверджують їх високу ефективність. Запропоновані паралельні алгоритми зорієнтовані на виконання на сучасних обчислювальних засобах зі спільною та розподіленою пам'яттю: комп'ютерах з багатоядерними процесорами, кластерах, гібридних архітектурах та у високопродуктивних розподілених середовищах. Одержані результати можна використати для дослідження стану та процесу функціонування складних природних та штучних ієрархічно-мережевих систем, їх окремих елементів чи підсистем. Результати роботи адаптовані стосовно дослідження залізничної транспортної системи України та автотранспортної системи великого міста.

Ключові слова: *складна мережева система, оцінювання, агрегація, прогнозування, режим реального часу, паралельний алгоритм, прискорення обчислень, автономні гілки, кластер.*

Вступ. Складні системи (СС) з ієрархічно-мережевою структурою [1, 2] використовуються в різних галузях діяльності: на транспорті (транспортні системи країн, великих міст), в енергопостачанні (системи електро-, газо-, нафто- та теплопостачання), торгівлі (мережі торговельних центрів та виробників і поставальників готової продукції), банківській справі (банківська система країни), освіті (мережі загальноосвітніх і професійно-технічних навчальних закладів та закладів вищої освіти), медицині (державна система охорони здоров'я), військовій справі (збройні сили країни) тощо. Необхідно зазначити, що складність систем тут пов'язана не лише з великою кількістю та різноманіттям типів їх складових (елементів, підсистем різних рівнів ієрархії), але і з характером взаємодій цих складових між собою та випадковим або регулярним впливом на них певних внутрішніх і зовнішніх факторів. Під час дослідження таких систем зазвичай використовуються значні обсяги вхідних даних про стан та процес функціонування їх об'єктів. Крім цього, більшість СС необхідно досліджувати в режимі реального часу, щоб вчасно реагувати на виявлені недоліки для їх повного усунення. У [3] була запропонована методика комплексного оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС), яка поєднує методи локального, прогностичного, агрегованого та інтерактивного оцінювання їх складових. Ця методика дозволила упорядкувати та дещо прискорити

сам процес оцінювання об'єктів системи для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

1. Формулювання проблеми

Методика комплексного оцінювання СІМС залучає до розгляду значну кількість характеристик об'єктів, параметрів і критеріїв оцінювання, режимів функціонування та оцінок складових системи. У багатьох випадках дані, які використовуються під час оцінювання, надходять неперервно. Важливою частиною згаданої методики є прогностичне оцінювання, яке необхідно здійснювати у режимі реального часу. Тому для ефективної реалізації запропонованої в [3] методики комплексного оцінювання об'єктів СІМС потрібно розробляти ефективні паралельні алгоритми обчислень з використанням сучасних програмних та апаратних засобів. У цьому і полягає вирішувана нами у даній роботі проблема. Далі опишемо розроблені паралельні алгоритми оцінювання.

2. Крупноблочне розпаралелювання

У [4] запропоновано загальний підхід до оптимізації обчислень під час комплексного оцінювання СІМС на основі розпаралелювання. Він ґрунтується на попередньому опрацюванні [5] в режимі реального часу вхідних даних та одночасному виконанні блоків із заданих сукупностей. Наприклад, для локального оцінювання поведінки m характеристик, які описують функціонування елементів системи, виконують блоки обчислень

$$X_1^f, X_2^f, \dots, X_m^f, \tag{1}$$

для оцінювання якості функціонування q елементів системи – блоки

$$F_1^e, F_2^e, \dots, F_q^e, \tag{2}$$

для оцінювання якості функціонування u підсистем СІМС – блоки

$$F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p, \tag{3}$$

а для інтерактивного оцінювання процесу функціонування w підсистем – блоки

$$I_1^p, I_2^p, \dots, I_w^p. \tag{4}$$

Залежно від типу СС та кінцевої мети оцінювання можуть розглядатись усі або лише деякі із виділених сукупностей блоків обчислень. Для кожного із наборів блоків здійснюється крупноблочне розпаралелювання. У цьому разі алгоритм є сукупністю повністю автономних або слабозв'язаних паралельних гілок, кожна з яких має значний обсяг. Зазначимо, що залежно від розглядуваної задачі оцінювання окремі набори блоків можуть виконуватись одночасно, як, наприклад, (3) та (4). У разі, коли досліджувані підсистеми СІМС формуються виключно на базі оцінюваних елементів, описаних відповідними характеристиками, то набори (1)–(3) блоків повинні виконуватись у послідовному режимі, а відповідна алгоритмічна конструкція тоді матиме вигляд:

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

Нами запропоновано і інші алгоритмічні конструкції [4] для організації паралельних обчислень та одержано оцінки прискорення, які підтверджують їх високу ефективність. Зокрема, встановлено умови, за яких прискорення паралельних обчислень за (5) дорівнює $(m+q+u)/3$, тобто набуває свого оптимального значення. Цими умовами є однаковість часів виконання обчислень в усіх блоках та нехтування часом на комунікації. Для подальшого зменшення часу обчислень є можливість їх розпаралелювання в межах кожного із виділених блоків під час локального оцінювання елементів, агрегованого оцінювання елементів і підсистем, прогнозування оцінок і поведінки характеристик та інтерактивного оцінювання об'єктів системи.

3. Локальне оцінювання елементів

У праці [6] запропоновано паралельно-последовний спосіб оптимізації процедури локального оцінювання за заданим параметром характеристики елемента СІМС. Побудовано паралельні алгоритми оцінювання у разі відсутності будь-яких обмежень на обчислювальні ресурси (обсяг пам'яті, кількість процесорів (ядер), вузлів кластера; продуктивність комунікаційного середовища) коли такі обмеження існують. Для обчислення значень параметрів локальної оцінки застосовано схему, близьку до повного бінарного дерева. Одержано оцінки прискорення, що підтверджують ефективність запропонованих паралельних алгоритмів. Зокрема, для обчислення значення w^0 -параметра локальної оцінки за даним критерієм пропонується використовувати алгоритмічну конструкцію:

$$\begin{aligned}
 &FOR \ i_1 = 1, \lceil \log_2 A \rceil \ DO \\
 &FOR \ j_1 = 1, 1 + 2^{i_1} \lceil A/2^{i_1} - 3/2 \rceil, 2^{i_1} \ DO \ PAR \\
 &fork \ (b(j_1) = b(j_1) + b(j_1 + 2^{i_1-1})); \\
 &d(j_1) = d(j_1) + d(j_1 + 2^{i_1-1}) \ join, \\
 &b(1) = b(1) + b(2 + 2^{\lceil \log_2 A \rceil - 1}) \\
 &w_0 = ((a^0 + 4 * \overline{b(1)} + 2 * \overline{d(1)} + a^T) * A_1)^{1/2}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Тут $b(j_1)$ ($j_1 = \overline{1, A+1}$) та $d(j_1)$ ($j_1 = \overline{1, A}$) – масиви, елементами яких є набори значень функції $(\alpha(t))^2$, обчислені відповідно в точках $T/(M-1), 3T/(M-1), \dots, (M-2)T/(M-1)$ та $2T/(M-1), 4T/(M-1), \dots, (M-3)T/(M-1)$, до того ж $A = \lceil (M-2)/2 \rceil$; a^0, a^T – це значення $(\alpha(0))^2, (\alpha(T))^2$ відповідно; $A_1 = T/(3(M-1))$; $\alpha(t)$ – допоміжна функція, що визначає величину відхилення значення деякої характеристики від її області допустимих значень за заданим критерієм у момент часу t , де $t \in [0, T]$; M – кількість значень функції $\alpha(t)$ на відрізку $[0, T]$; $\lceil b \rceil$ означає ціле число, що задовольняє нерівність $b \leq \lceil b \rceil < b+1$; PAR задає одночасне виконання фрагменту обчислень між $fork, join$, де j_1 змінюється з кроком 2^{i_1} від 1 до $1 + 2^{i_1} \lceil A/2^{i_1} - 3/2 \rceil$; $\lceil \cdot \rceil$ означає взяття цілої частини. Параметр оцінювання w^0 ґрунтується на середньоквадратичній метриці і його значення дають змогу визначити усереднене значення виходу заданої характеристики чи її похідних за межі допустимої області або відхилення від вибраного еталону. Зауважимо, що в

конструкції (6) кома після службового слова *join* вказує на кінець тіла циклу за змінною i_1 .

Припустимо, що t^+ , t^* , t° – це відповідно часи реалізації операцій додавання, множення та взяття квадратного кореня. Тоді використання (6) порівняно з послідовним виконанням призведе до прискорення обчислень у ν^0 разів, при цьому $\nu^0 = (3t^* + 2(A+1)t^+ + t^\circ) / (3t^* + (4 + \log_2 A)t^+ + t^\circ)$. Якщо припустити, що виконуються рівності $t^+ = t^* = t^\circ$, то одержимо $\nu^0 = (2A+6) / (8 + \log_2 A)$. Звідси легко можна отримати, що із збільшенням значення A величина ν^0 буде зростати. Наприклад, для $A=9$ одержуємо $\nu^0 \approx 2.15$, а для $A=24$ маємо $\nu^0 \approx 4.29$.

4. Агреговане та прогностичне оцінювання складових системи

На підставі аналізу методики агрегованого оцінювання поведінки деякої характеристики системи, що функціонує у заданому режимі, у [7] для розпаралелювання обчислень побудовано дерево аналізу, яке має чотири яруси. У вершинах кожного ярусу обчислюються оцінки певного рівня узагальнення (локальні, 1–3 рівня). Для розпаралелювання обчислень під час оцінювання процесу функціонування СІМС загалом пропонується використати дерево, що має три яруси. У ньому обчислення у кожній з вершин першого ярусу можна подати деревом, про яке згадувалось вище. У вершинах другого ярусу обчислюють зважені оцінки 4-го рівня узагальнення, а у вершині третього ярусу – оцінку процесу функціонування системи. На основі цих дерев запропоновано ефективні алгоритмічні конструкції для виконання паралельних обчислень.

Залежно від можливостей комп'ютера та типу розв'язуваної задачі оцінювання для організації паралельних обчислень у кожному конкретному випадку може бути використана відповідна алгоритмічна конструкція. Зокрема, на початковому етапі розпаралелювання під час оцінювання поведінки окремої характеристики системи, що функціонує у заданому режимі, або під час оцінювання якості функціонування системи загалом може бути використана конструкція

$$\text{fork } (\tilde{h}_1; \tilde{h}_2; \dots; \tilde{h}_{t_0}) \text{ join, } \tilde{h}, \quad (7)$$

що задає обчислення в основному фрагменті задачі оцінювання у вигляді t_0 паралельних автономних гілок \tilde{h}_j ($j = \overline{1, t_0}$), результати яких використовують в іншому фрагменті \tilde{h} .

На наступному етапі розпаралелювання замість (7) використовуємо (8), яка є ефективнішою алгоритмічною конструкцією.

$$\begin{aligned} &\text{fork } (\text{fork } (\tilde{h}_1^1; \tilde{h}_1^2; \dots; \tilde{h}_1^v) \text{ join, } \tilde{h}_1^0; \text{fork } (\tilde{h}_2^1; \tilde{h}_2^2; \dots; \tilde{h}_2^v) \text{ join, } \tilde{h}_2^0; \dots; \\ &\text{fork } (\tilde{h}_{t_0}^1; \tilde{h}_{t_0}^2; \dots; \tilde{h}_{t_0}^v) \text{ join, } \tilde{h}_{t_0}^0) \text{ join, } \tilde{h}. \end{aligned} \quad (8)$$

Конструкція (8) задає обчислення в основному фрагменті гілки \tilde{h}_r у вигляді ν паралельних автономних гілок $\tilde{h}_r^{j'}$ ($j' = \overline{1, \nu}$).

У разі, коли T_0, \tilde{T}_0 – відповідно кількість виконуваних арифметичних операцій у кожній з гілок $\tilde{h}_j^{j'}$ ($j' = \overline{1, v}; j = \overline{1, t_0}$) та у кожному з фрагментів \tilde{h}_j^0 ($j = \overline{1, t_0}$), тоді прискорення обчислень унаслідок використання (8) набуває значення

$$(vT_0 + \tilde{T}_0)(rt_0 + 1) / ((r + v)T_0 + (r + 1)\tilde{T}_0).$$

Тут узято до уваги рівність $\tilde{t} = vT_0 + \tilde{T}_0$. Припустимо, що $T_0 = r_1\tilde{T}_0$, $r_1 \geq 1$, тоді наведений вираз для прискорення трансформується в

$$(vr_1 + 1)(rt_0 + 1) / ((r + v)r_1 + r + 1).$$

Справедливим є наступне твердження [7].

Твердження. У разі $v \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$, $r \geq 1$, $r_1 \geq 1$ справджується така нерівність $(vr_1 + 1) / ((r + v)r_1 + r + 1) > 1 / (r + 1)$.

Доведення випливає із виразу $(vr_1 + 1) / ((r + v)r_1 + r + 1) = 1 / (1 + (r_1 + 1)r / (vr_1 + 1))$, оскільки за умовою $vr_1 + 1 \neq 0$.

На підставі сформульованого твердження одержимо, що прискорення обчислень, заданих конструкцією (8), є більшим за прискорення обчислень, організованих згідно з (7).

Стосовно прогностичного оцінювання можна сказати, що загалом прогнозують як поведінку характеристик різних об'єктів системи, так і самі оцінки (локальні, агреговані, інтерактивні). Для паралельного виконання процедури прогностичного оцінювання пропонується паралельний алгоритм з d_0 автономними гілками. У кожній з цих гілок прогнозують поведінку певної кількості характеристик і/або деяку кількість оцінок. У разі однакової обчислювальної складності гілок прискорення паралельного алгоритму набуває свого оптимального значення, тобто є близьким до d_0 . Якщо ж паралельні гілки мають різну складність, то деякі з них можна об'єднати так, щоб складність новоутворених гілок була приблизно однаковою. Тоді не виникає неочікуваних ситуацій під час реалізації такого алгоритму на комп'ютерах з багатоядерними процесорами та кластерах.

5. Інтерактивне оцінювання об'єктів СІМС

Інтерактивне оцінювання здійснюється на рівні аналізу взаємодії таких складових СІМС, як потоки і лінія, що є послідовністю вузлів і ребер. Основною метою цього оцінювання є виявлення і локалізація саме регулярних негативних факторів, які зумовлюють відхилення від встановленого графіка руху потоків. Як приклад досліджуваної системи у цьому разі розглядалась залізнична транспортна система України. У праці [8] формалізовано процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС з повністю впорядкованим рухом потоків, яка складається із п'яти кроків, на кожному з яких обчислюються оцінки вузлів і ребер, починаючи від локальних і закінчуючи оцінкою 4-го рівня узагальнення. Для реалізації такої процедури побудовано паралельні алгоритми. У разі обмеження обчислювальних ресурсів відповідна алгоритмічна конструкція має вигляд:

$$\text{fork } (g_1^0, g_2^0, \dots, g_p^0) \text{ join,}$$

$$\text{fork } (g_1^1, g_2^1, \dots, g_p^1) \text{ join,}$$

$$\text{fork } (g_1^2, g_2^2, \dots, g_p^2) \text{ join,} \quad (9)$$

$$\text{fork } (g_1^3, g_2^3, \dots, g_p^3) \text{ join,}$$

$$h^4,$$

де p – це кількість паралельних гілок, які реально можна одночасно виконати на наявному обчислювальному засобі; $g_l^0 (l = \overline{1, p})$ – паралельні гілки, в кожній з яких обчислюється l_0/p локальних оцінок; $g_l^1, g_l^2, g_l^3 (l = \overline{1, p})$ – паралельні гілки, в яких обчислюється відповідно $l_1/p, l_2/p, l_3/p$ оцінок 1-го, 2-го та 3-го рівня узагальнення. Тут l_0, l_1, l_2, l_3 – загальні кількості оцінок відповідного типу і вважається, що ці величини є кратними до p . Обчислення згідно з (9) можна організувати так, щоб гілки в межах кожного з паралельних фрагментів мали приблизно однакову складність. У [8] встановлено умови, за яких прискорення паралельних обчислень є близьким до свого оптимального значення, тобто до p .

У [9] формалізовано процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС у разі частково впорядкованого руху потоків з використанням методів U -статистик [10–12]. Як приклад реальної системи розглядається автотранспортна система великого міста. Згадана процедура ґрунтується на локальному та агрегованому оцінюванні. Локальне оцінювання складається з чотирьох кроків і його результатом є узагальнені висновки про поведінку сукупності середнього часу руху автотранспортних засобів та режим роботи світлофорів протягом вказаного періоду. На основі локальних оцінок будуються агреговані висновки про стан елементарних ділянок, ребер, підмереж району та інфраструктури міста загалом. Аналогічно будуються узагальнені висновки для локальних оцінок, які характеризують ефективність роботи окремих світлофорів на автошляхах міста.

Запропоновано паралельний алгоритм для обчислення локальних оцінок про стан елементарних ділянок за вказаний період часу. Цей алгоритм складається із п'яти наборів автономних гілок, в кожному з яких обчислюються відповідно сукупності середнього та очікуваного часів перебування автотранспортних засобів на елементарних ділянках шляху та перехрестях; норми, що використовуються під час обчислення власне U -статистик; самі значення цих статистик; уточнені бальні оцінки поведінки згаданих статистик протягом заданого періоду та робляться узагальнені висновки на підставі використання методу лінійної агрегації. Показано [9], що найменше прискорення запропонованого паралельного алгоритму дорівнює 4 і для добре структурованої автотранспортної мережі міста воно може лише зростати.

Для виконання процедури агрегованого оцінювання запропоновано паралельний алгоритм, який складається з трьох наборів автономних гілок, в яких обчислюються агреговані оцінки відповідно 1-го, 2-го та 3-го рівнів узагальнення, і одного фрагменту, в якому обчислюється оцінка 4-го рівня узагальнення. Встановлено [9], що для найпростішої структури системи прискорення цього алгоритму буде більшим за 11. Очевидно, що для більш реального прикладу досліджуваної автотранспортної системи великого міста воно буде зростати.

Висновки. У роботі запропоновано підходи до побудови ефективних паралельних алгоритмів дослідження стану та процесу функціонування складних систем з ієрархічно-мережевою структурою. Як реальні приклади таких систем розглядалися

залізнична транспортна система України та автотранспортна система великого міста. Одержано прискорення для побудованих паралельних алгоритмів обчислень, яке підтверджує їх високу ефективність. Запропоновані паралельні алгоритми оцінювання зорієнтовані для реалізації на комп'ютерах з багатоядерними процесорами, кластерах, гібридних архітектурах [13–15] та високопродуктивних обчислювальних середовищах [16]. Одержані результати можна використати для дослідження об'єктів СІМС різного призначення [10,17–20].

Література

1. Polishchuk O., Polishchuk D., Tyutyunnyk M., Yadzhak M. Issues of regional development and evaluation problems. AASCIT Communications. 2015. 2(4). P. 115–120.
2. Берб'юк В. С., Демидюк М. В., Литвин Б. А. Параметрична оптимізація ходи та пружних характеристик пасивних приводів двоногого крокуючого робота. Вісник Київського університету. Серія: Кібернетика. 2002. № 3. С.17–20.
3. Поліщук О. Д., Поліщук О. Д., Яджак М. С. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина I. Опис методики. Системні дослідження та інформаційні технології. 2015. № 1. С. 21–31.
4. Яджак М. С., Поліщук О. Д., Тютюнник М. І. Оптимізація методики комплексного оцінювання складних систем на підставі паралельних обчислень. Інформатика та математичні методи в моделюванні. 2016. № 4. С. 347–356.
5. Яджак М. Паралельні методи та алгоритми розв'язання задач цифрової фільтрації масивів даних. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2022. Вип. 34–35. С. 77–83.
6. Поліщук О. Д., Тютюнник М. І., Яджак М. С. Організація паралельних обчислень для локального оцінювання якості функціонування складних систем. Відбір і обробка інформації. 2010. Вип. 32 (108). С. 119–124.
7. Поліщук О. Д., Тютюнник М. І., Яджак М. С. Оцінка якості функціонування складних систем на основі паралельної організації обчислень. Відбір і обробка інформації. 2007. Вип. 26 (102). С. 121–126.
8. Поліщук О. Д., Яджак М. С. Мережіві структури та системи: IV. Паралельне опрацювання результатів неперервного моніторингу. Системні дослідження та інформаційні технології. 2019. № 2. С. 105–114.
9. Поліщук О. Д., Яджак М. С. Аналіз ефективності функціонування автотранспортної системи міста методами U -статистик. I. Оптимізація методики інтерактивного оцінювання. Кібернетика та системний аналіз. 2024. Т. 60, № 2. С. 119–127.
10. Поліщук О. Д., Яджак М. С. Моделі та методи комплексного дослідження складних мережевих систем та міжсистемних взаємодій. Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2023. 385 с.
11. Lee A. J. U -statistics: Theory and practice. London: Routledge, 2019. 320 p.
12. Korolyuk V. S., Borovskich Y. V. Theory of U -statistics. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. 554 p.
13. The list Top500 [Online]. Available: www.top500.org.
14. Попов О. В., Рудич О. В. Блочний алгоритм перетворень Хаусхолдера для комп'ютерів гібридної архітектури. Проблеми програмування. 2014. № 2–3. С. 99–106.
15. Попов О. В., Рудич О. В. До розв'язування систем лінійних рівнянь на комп'ютерах гібридної архітектури. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки: зб. наук. праць. 2017. Вип. 15. С. 158–164.
16. Polishchuk O., Polishchuk D., Tyutyunnyk M., Yadzhak M. Big Data Processing in complex hierarchical network systems. arXiv: 1603.00633 [physics.data-an]. 2016. 7 p.
17. Berbyuk V. E., Demidyuk M. V. Parametric optimization in problems of dynamics and control of motion of an elastic manipulator with distributed parameters. Mechanics of Solids. 1986. Vol. 21, is. 2. P. 78–86.
18. Jackson M. O. Social and economic networks. Princeton: Princeton University Press, 2010. 520 p.
19. Lesne A. Complex networks: from graph theory to biology. Letters in Mathematical Physics. 2006. Vol. 78, N 3. P. 235–262.
20. Valdez L. D., Braunstein L. A., Havlin S. Epidemic spreading on modular networks: the fear to declare apandemic. arXiv: 1909.09695v2 [physics.soc-ph]. 23 March 2020. 38 p.

Михайло Яджак, Марія Тютюнник
Побудова паралельних алгоритмів дослідження об'єктів складних систем з ієрархічно-мережевою структурою

Construction of parallel algorithms for the study of complex systems objects with a hierarchical-network structure

Yadzhak Mykhailo, Tyutyunnyk Maria

The procedure for complex evaluation of complex systems objects that have a hierarchical-network structure has been formalized. In order to realization this procedure in real time mode, parallel computation algorithms are proposed. Speed up estimates were obtained for the mentioned algorithms, which confirm their high efficiency. The proposed parallel algorithms are oriented for execution on modern computing means with shared and distributed memory: computers with multi-core processors, clusters, hybrid architectures and in high performance distributed environments. The obtained results can be used to study the state and process of complex natural and artificial hierarchical-network systems functioning, their individual elements or subsystems. The results of the work are adapted to the study of the railway transport system of Ukraine and the motor transport system of a large city.

Keywords: complex network system, evaluation, aggregation, forecasting, realtime mode, parallel algorithm, speed up of computations, autonomous branches, cluster.

Отримано 27.02.24.