Компьютерная Математика

Инструментальные средства информационных технологий

УДК 681.3.06

С.В. ЄРШОВ, Р.М. ПОНОМАРЕНКО

ЯРУСНО-ПАРАЛЕЛЬНА МОДЕЛЬ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ ЛОГІЧНОГО ВИВЕДЕННЯ У НЕЧІТКИХ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМАХ

Розглядається ярусно-паралельна модель для здійснення нечіткого логічного виведення в експертно-діагностичних програмних системах, бази знань яких ґрунтуються на нечітких правилах. Розроблена ярусно-паралельна процедура нечіткого виведення, яка дозволяє прискорити виконання обчислень в програмній системі, що призначена для оцінки якості наукових робіт. Побудовані оцінки ефективності ярусно-паралельної схеми обчислень за наявності складних графів залежностей між блоками нечітких правил Такагі – Сугено.

Вступ. Останнім часом велика увага приділяється розвитку методів алгоритмів логічного виведення для вирішення наукових та практичних задач [1 – 3]. При застосуванні алгоритмів нечіткого логічного виведення досвід або знання експерта, що описується як база нечітких правил, може бути безпосередньо вбудований в систему. Створення методів систематичного проектування систем нечіткої логіки висвітлено в [2, 3]. В багатьох роботах акцент робиться на розбиття вхідного простору задачі з метою визначення нечітких правил і параметрів, що залучаються в нечіткі правила для однієї окремої нечіткої системи [2]. Як відомо, проблема великої розмірності нечітких систем, що можуть бути побудовані на основі нечітких правил є невирішена [3].

Для зменшення складності нечітких систем логічного виведення було запропоновано поняття нечітких багаторівневих систем, в яких входи та виходи яких пов'язані між собою [2, 3]. Побудова багаторівневої нечіткої системи є складною задачею оскільки необхідно визначити архітектуру системи (модулі, вхідні змінні кожного модуля, і взаємодія між модулями), а також правила для кожного модуля. При цьому внаслідок збільшення кількості модулів (систем нечіткого виведення) значно зростає час обчислень. Перспективним є застосування паралельних обчислень для скорочення часу обчислень при здійсненні нечіткого логічного виведення при побудові діагностичних та експертних систем, що ґрунтуються на методах нечіткої математики.

Багаторівнева архітектура використовується при побудові нечітких мультиагентних систем, що функціонують у розподіленому середовищі [4 – 6].

Мета даної роботи – дослідження та обґрунтування ярусно-паралельної моделі обчислень для здійснення логічного виведення у нечітких багаторівневих системах Такагі – Сугено.

Системи нечіткого виведення складаються з набору правил якщо-то. Нечітка модель Такагі – Сугено представлена нечіткими правилами [2]:

$$R_j: \text{якщо } x_1 \in A_{1j} \text{ та } x_2 \in A_{2j} \text{ та ... та } x_n \in A_{nj},$$
$$\text{то } y = g_j(x_1, x_2, ..., x_n), \quad j = 1, 2, ..., N,$$

де g_j є чіткою функцією від x_i. Як правило, $g_j(x_1, x_2, ..., x_n) = \omega_0 + \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + ... + \omega_n x_n$. Загальний вихід нечіткої моделі отримуємо наступним чином:

$$y = \sum_{j=1}^{N} g_i \overset{m_j}{\underset{i=1}{T}} \mu_{ij}(x_i) \Big/ \sum_{j=1}^{N} \overset{m_j}{\underset{i=1}{T}} \mu_{ij}(x_i),$$

де $1 \le m_j \le n$ – це число вхідних змінних, які з'являються в антецеденті правила j, N – кількість нечітких правил, n – кількість входів, функції належності нечітких множин, T являє собою T-норму, що використовується як операція кон'юнкції.

Нечітка система Такагі – Сугено являє собою одноступінчату (елементарну) нечітку систему. Багаторівневі (ієрархічні) системи нечіткого виведення не тільки забезпечують більш складну і гнучку архітектуру для моделювання систем з нелінійними залежностями, але також дозволяють значно зменшити розмір бази правил, що використовується в процесі нечіткого виведення. На рис. 1 показано приклад багаторівневої системи Такагі – Сугено, що містять 4 вхідних змінні та 2 ієрархічних рівня.

Результат роботи ієрархічної системи нечіткого виведення Такагі – Сугено може бути розрахований на пошаровій основі. Далі показаний процес обчислення для системи 1 на рис. 1. Припустимо, що значення кожної вхідної змінної (x_1, x_2, x_3, x_4) представлені двома нечіткими множинами, що задані нечіткими функціями належності $\mu(a, b, x) = 1/(1 + ((x - a)/b)^2)$. По-перше, обчислюється вихідне значення нечіткої підсистеми Такагі – Сугено (вершини 2).

Припустимо, що використовувані нечіткі множини змінних x_3 і x_4 є A_{11}, A_{12} і A_{21}, A_{22}, відповідно. Припустимо, що параметри в консеквентах бази правил вершини 2 є c_{ij}^0, c_{ij}^1, c_{ij}^2 (i = 1, 2 та j = 1, 2). Таким чином, відповідні нечіткі правила вузла 2 можна описати так:

$$R_{ij}: \text{якщо } x_3 \in A_{1i} \text{ та } x_2 \in A_{2j}, \text{ то } y_{ij} = c_{ij}^0 + c_{ij}^1 x_3 + c_{ij}^2 x_4, \quad i = 1, 2, \; j = 1, 2.$$

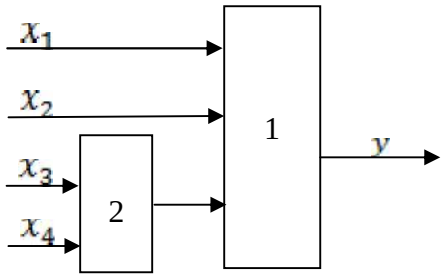

РИС. 1. Приклад багаторівневої нечітко-логічної моделі, кількість входів – 4, кількість шарів – 2

Вихідне значення вузла 2 може бути розраховано на основі нечіткої моделі Такагі – Сугено наступним чином:

$$y = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sigma_{ij}y_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sigma_{ij},$$

де $\sigma_{ij}(x_3, x_4) = \mu_{A_{1i}}(x_3)\mu_{A_{2j}}(x_4), \quad i = 1, 2$ та $j = 1, 2.$

По-друге, обчислюється загальне вихідне значення ієрархічної нечіткої моделі Такагі – Сугено. Воно обчислюється на основі трьох вхідних значень, x_1, x_2 і y, вихідного значення нечіткої підсистеми Такагі – Сугено (вузол 2).

Розглянемо організацію ярусно-паралельних обчислення при побудові систем оцінки якості наукових робіт, що подаються на конференцію [7]. Оцінка робіт здійснюється трьома експертами. Значення частинних (базових) так і укрупнених (виведених як наслідок) оцінок задаються лінгвістичними термами, наприклад, ОДНОЗНАЧНО ТАК, МАБУТЬ НІ, ВАЖКО ВИЗНАЧИТИ. На основі укрупнених оцінок трьох експертів виводиться інтегрована оцінка рівня роботи, задана числом в інтервалі [0,1], на основі якого приймається рішення (ПРИЙНЯТИ, ВІДХИЛИТИ, ДОРОБИТИ). При використанні систем Такагі – Сугено робота кожного експерта може бути представлена блоками правил, кількість яких значно менша, ніж при використанні єдиного блоку правил, що описують залежність прийнятого рішення щодо рівня роботи від елементарних показників якості.

Ієрархічний зв’язок інтегральної оцінки рівня наукової роботи з оцінками за окремими показниками якості роботи представимо графом (деревом) нечіткої багаторівневої системи (рис. 2), яке визначає структуру моделі нечіткого дерева.

Вершини дерева інтерпретуються таким чином: корінь дерева – показник, що діагностується; термінальні вершини – частинні оцінки роботи; нетермінальні вершини (подвійні лінії) – згортка частинних оцінок в укрупнені. Дуги, що виходять з нетермінальних вершин дерева, відповідають укрупненим оцінкам наукової роботи.

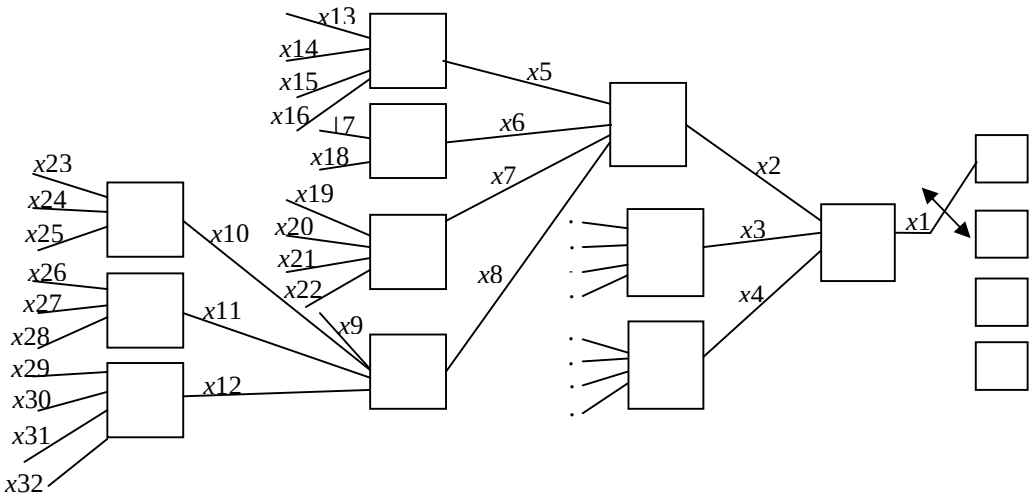

РИС. 2. Дерево логічного виведення для оцінювання рівня наукових робіт

Змістовна інтерпретація частинних та укрупнених оцінок робіт наведена в таблиці. Результати нечіткого логічного виведення можна контролювати за допомогою графічного інтерфейсу, фрагмент якого показано на рис. 3. При цьому кожному з трьох експертів необхідно ввести лінгвістичні значення частинних оцінок роботи (змінні $x13 - x32$). Система виводить рекомендовані значення оцінок експертів та показує, які правила мали найбільший вплив на висновок. Остаточне рішення приймається враховуючи відповідні рішення експертів за системою правил, яка виробляє значення $x1$.

Якщо використовувати дерево логічного виведення як граф інформаційних залежностей, то доцільно застосувати паралельно-ярусну модель обчислень, яка дозволяє скоротити час обчислень. Таке скорочення відбувається за рахунок одночасного виконання логічного виведення всіх нечітких систем одного яруса в разі, якщо кількість процесорів не менша, ніж кількість систем в одному ярусі. В разі, якщо кількість нечітких систем більша, ніж кількість процесорів, процесори мають послідовно виконувати виведення кількох нечітких систем.

Показана на рис. 2 система нечіткого логічного виведення містить 25 блоків правил, нижній ярус якої має максимальну ширину, що становить 18 блоків нечітких правил. Графічний інтерфейс вищезазначеної системи показано на рис. 3. При паралельному виконанні при достатній кількості процесорів суперкомп'ютера СКІТ коефіцієнт прискорення складає 6,27.

На рис. 4 показано схему процедури run_of_storey_sheme_mpi(), що забезпечує паралельне виконання багаторівневих нечітких систем логічного виведення за допомогою побудови паралельно-ярусної схеми та технологічних можливостей MPI. Побудова ярусів здійснюється за графом залежностей нечітких систем, до початку паралельного виконання.

ТАБЛИЦЯ. Змістовна інтерпретація частинних та укрупнених оцінок робіт

Назва змінної	Змістовна інтерпретація
*x*1	Інтегрована оцінка рівня роботи
*x*2	Інтегрована оцінка першого рецензента
*x*3	Інтегрована оцінка другого рецензента
*x*4	Інтегрована оцінка третього рецензента
*x*5	Оригінальність роботи
*x*6	Значення роботи для певної області досліджень
*x*7	Якість способу подання результатів
*x*8	Якість вмісту роботи
*x*9	Заголовок. Чи заголовок ясно відображає зміст статті?
*x*10	Якість анотації
*x*11	Якість вступу
*x*12	Якість представлення результатів
. . .	
*x*26	Правильність виділення існуючих проблем
*x*27	Постановка цілей дослідження
*x*28	Представлення наукової новизни та практичного значення у вступі
*x*29	Чіткість викладення основних результатів
*x*30	Наявність відповідних посилань на роботи в даній області
*x*31	Однозначність тлумачення представлених результатів
*x*32	Відсутність необґрунтованих припущень та домислів у результатах

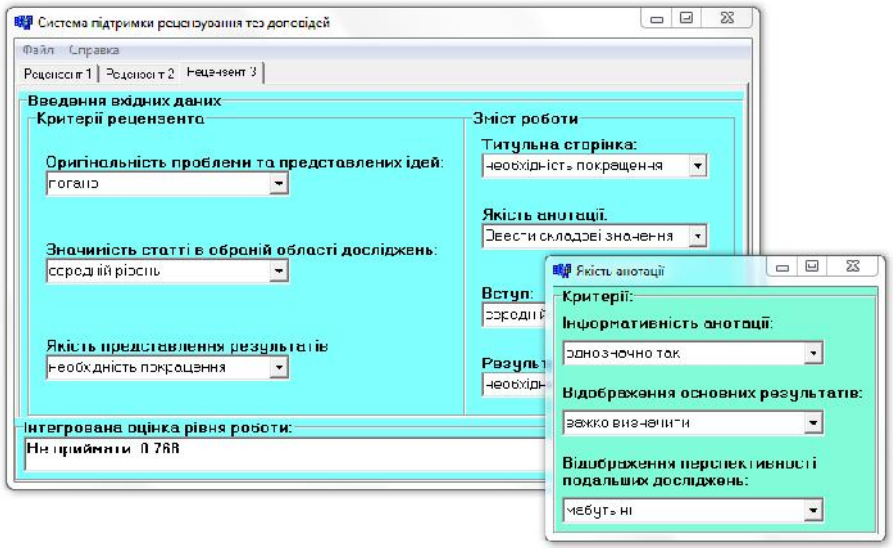

РИС. 3. Графічний інтерфейс користувача системи для оцінювання рівня наукових робіт, поданих на конференцію

Для ярусно-паралельної моделі обчислень важливим є той факт, що операції, яким відповідають вершини одного ярусу, не залежать одне від одного (не перебувають у відношенні зв'язку) [8]. Тому існує паралельна реалізація алгоритму, в якій вони можуть бути виконані паралельно на різних процесорах суперкомп'ютера СКІТ-4 [9]. Тому ярусно-паралельна форма алгоритму може бути використана для підготовки такої паралельної реалізації алгоритму.

Розглянемо роботу даної схеми. При роботі даного методу спочатку необхідно виконати розподіл нечітких систем по ярусам за допомогою функції storey_sheme(), де її параметром буде покажчик двомірного динамічного списку для зберігання номерів систем по кожному ярусу. Наступним кроком стане виклик функції ranks(), де визначається для кожної системи в кожному ярусі номер процесу, який виконуватиме дану систему. Номер процесу залежить як від кількості систем в ярусі, так і від кількості виділених процесів. Параметром функції ranks() є покажчик одномірного динамічного списку. Робота програми після побудови даних схем виконується циклічно.

Особливо необхідно звернути увагу, що в даній схемі обмін даними між процесорами здійснюється лише у випадку, якщо системи наступного ярусу, які залежать від системи (блоку правил) поточного ярусу, не будуть обчислені на тому процесорі, на якому була обчислена поточна нечітка система. Інакше отримані значення вихідних змінних зберігаються в оперативній пам'яті та використовуються у наступних ярусах при обчисленні блоків правил, що залежать від даних параметрів. Такий підхід зменшує кількість обмінів між процесами, внаслідок чого скорочується час виконання програми.

За реалізацію вищезазначених рішень відповідають функції system_r() та system_s(), що показані на рис. 4. Функція system_r() перевіряє дані, що мають бути прийняті до початку виконання системи, system_s() – перевіряє необхідність передачі даних системам вищого ярусу, що залежать від поточної нечіткої системи.

Запускається подвійний цикл, що обходить кожний ярус, та кожний елемент в ярусі. При цьому для кожного елементу (points[i][k]), номер процесу (rank_points) якого збігається з наявним номером процесу, виконується наступне: 1) для зручності запам'ятовуємо значення елементу points[i][k], що містить номер системи, в окрему змінну system_number; 2) циклічно перевіряємо залежність даної системи від інших за допомогою функцій system_r(), та при кожному знаходженні такої залежності за допомогою MPI_Recv() приймаємо необхідні дані. Ці дані зберігаються викликом функції add_inputs(); 3) викликаємо виконання інтелектуальної нечіткої системи по заданому номеру функцією run(), та зберігаємо результат до змінної result; 4) здійснюємо перевірку на необхідність передачі даних за допомогою функції system_s(); 5) за допомогою функції MPI_Send() посилаємо результат виконання даної системи процесам, де будуть виконані наступні системи, залежні від даної, якщо такі є.

```
void run_of_storey_sheme_mpi()
{
    storey_sheme( points ); //Побудова дерева ярусів
    ranks( rank_points ); //Визначення номерів процесів
        // для систем у кожному ярусі
    for( int i = 0; i < points.size(); i++ )
    for( int k = 0; k < points[ i ].size(); k++ )
        if( rank == rank_points[ points[ i ][ k ] ] )
        { system_number = points[ i ][ k ];
          for( int s = 0; s < N; s++ )
              if( system_r( system_number, s ) )
              {
                MPI_Recv( &result_value, 1, MPI_DOUBLE,
                             rank_points[ s ], MPI_ANY_TAG,
                             MPI_COMM_WORLD, &status );
                add_inputs( result_value );
              }
          result = FuzzySystems[ system_number ]->run();
          for( int s = 0; s < N; s++ )
              if( system_s( s, system_number ) )
                MPI_Send( &result, 1, MPI_DOUBLE,
                     rank_points[ s ], 0, MPI_COMM_WORLD );
        }
}
```

РИС. 4. Фрагмент ярусно-паралельної схеми обчислень на основі MPI

В загальному випадку, модель багаторівневої нечіткої системи може бути представлена ациклічним графом, вершини якої виконують окремі блоки нечітких правил. Ефективність ярусно-паралельних обчислень для такої системи оцінювалася за допомогою генерації орієнтованого ациклічного графа залежностей між нечіткими системами, який не містить циклів, та наявність ребер якого визначалася за допомогою датчика випадкових чисел. На рис. 5 показано отриманий час виконання багаторівневих нечітких систем на кластері СКІТ для виконання багаторівневої нечіткої системи для кількості вершин (v = 1000), де v – кількість вершин.

Важливим параметром при цьому є кількість ребер, яка визначалася як $e = v^q$. Для графу з кількістю вершин v = 1000, q = 1 отримано прискорення $\approx 10,8$ прискорення при виконанні на 16 вершинах СКІТ-4. Аналогічне прискорення при кількості $1000^{1,7}$ ребер складає 2,1. Таким чином, при збільшенні кількості ребер, збільшується час виконання ярусно-паралельної моделі, оскільки, незалежно від кількості процесорів, кількість систем, що можуть бути вико собою. Також у цьому випадку час виконання збільшуються за рахунок більшого обсягу передач даних між процесорами.

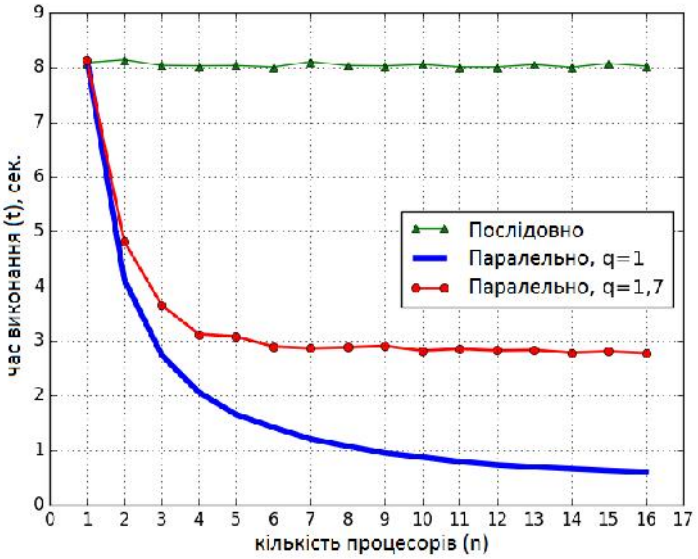

РИС. 5. Залежність часу виконання ярусно-паралельних обчислень для багаторівневої системи з великою кількістю вершин (v = 1000)

Графік прискорення для q = 1.7 (рис. 5) відображає тенденцію, що при кількості процесорів більшій ніж 6, суттєвого покращення ефективності не спостерігається. Така тенденція виникає внаслідок зменшення ширини кожного ярусу, яка стає значно меншою за кількість виділених ресурсів (процесорів). Тому при збільшенні кількості процесорів все більша кількість з них не бере участі в обчисленнях. При q = 1 спостерігається ще більше прискорення ніж при q = 1.7. Тому в такому випадку є доцільним подальше збільшення кількості процесорів.

Висновки. Запропонована та обґрунтована ярусно-паралельна модель для здійснення нечіткого логічного виведення в експертно-діагностичних програмних системах, бази знань яких ґрунтуються на блоках взаємопов'язаних нечітких правилах. Розроблена ярусно-паралельна процедура нечіткого виведення, яка дозволяє прискорити виконання обчислень в програмній системі, що призначена для оцінки якості наукових робіт. Проведені експе-рименти на кластерному комп'ютері СКІТ, що дозволяють оцінити ефективність ярусно-паралельної схеми обчислень за наявності складних графів залежностей між блоками нечітких правил Такагі – Сугено.

С.В. Ершов, Р.М. Пономаренко

ЯРУСНО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В НЕЧЕТКИХ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМАХ

Рассматривается ярусно-параллельная модель для осуществления нечеткого логического вывода в экспертно-диагностических системах, базы знаний которых основываются на нечетких правилах. Разработана ярусно-параллельная процедура нечеткого вывода, позво-

ляющая ускорить выполнение вычислений в программной системе, предназначенной для оценки качества научных работ. Построены оценки эффективности ярусно-параллельной схемы вычислений при наличии сложных графов зависимостей между блоками нечетких правил Такаги – Сугено.

S.V. Yershov, R.M. Ponomarenko

TIER PARALLEL COMPUTING MODEL FOR LOGICAL INFERENCE ON FUZZY MULTILEVEL SYSTEMS

Tier parallel model to implement fuzzy logic inference in expert diagnostic software systems and knowledge bases whith fuzzy are considered. Tier parallel fuzzy inference procedure that allows faster computing in a software system that is designed to assess the quality of scientific work is developed. Evaluating of the effectiveness of tier parallel scheme of computing in the presence of complex graphs relationships between the blocks fuzzy Takagi – Sugeno rules are constructed.

1. *Zadeh L.A.* The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // Information Sciences. – 1975. – Vol. 8, N 8. – P. 199 – 249; P. 301 – 357.
2. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
3. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ, 2005. – 736 с.
4. *Парасюк И.Н., Ершов С.В.* Трансформационный подход к разработке интеллектуальных агентов на основе нечетких моделей // Проблеми програмування. – 2011. – № 2. – С. 62 – 78.
5. *Ершов С.В.* Модель интеллектуальных агентов, основанная на нечеткой логике высшего типа // Компьютерная математика. – 2012. – № 1. – С. 10 – 16.
6. *Ершов С.В.* Принципы построения нечетких мультиагентных систем в распределенной среде // Там же. – 2009. – № 2. – С. 54 – 61.
7. *ТААС* 2015. – http:// /taac.org.ua.
8. *Воеводин В.В., Воеводин Вл. В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
9. *Суперкомпьютеры* ИК НАН Украины. – http:// /icybcluster.org.ua.

Одержано 16.02.2016

Про авторів:

Єршов Сергій Володимирович,
доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,
sershv@ukr.net

Пономаренко Роман Миколайович,
аспірант Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.
ponomarenko_roman@ukr.net