УДК 681.324-681.3.06

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ КОСМІЧНОЇ СИСТЕМИ

к.т.н. О.В. Барабаш
(подав д.т.н., проф. Д.В.Голкін)

Пропонується метод забезпечення функціональної стійкості на рівні структури великої організаційної інформаційної системи. Як об'єкт досліджень розглядається мережа передачі даних розподіленої інформаційної космічної системи.

Вступ. Розподілена інформаційна космічна система (ІКС) призначена для вироблення керуючих впливів при управлінні польотами космічних апаратів (КА), прийому, збору й обробки інформації, яка одержується з КА, і пересилання інформаційних масивів споживачам.

Особливий інтерес на даний час викликають питання проектування мереж передачі даних (МПД), на основі яких будуються ІКС. Дані МПД використовують технології корпоративних обчислювальних мереж, у яких апаратні та програмні ресурси розподілені на території всієї держави.

В Україні накопичені значний теоретичний матеріал і практичний досвід створення обчислювальних мереж (ОМ). Основні принципи побудови ОМ стосовно до умов нашої країни розроблені та викладені в роботах Глушкова В.М. і його учнів [1, 2, 7]. Питання синтезу структури ОМ розглянуті в роботах вчених Ю.П. Зайченка, В.Г. Лазарєва, Ю.І. Лосєва, В.С. Семеніхіна, Г.Ф. Янбих, І.О. Мізіна, а також Д. Берсакеса, Л. Клейнрока, Д. Девіса, П. Верми, Х. Франка, Р. Пріма та ін.

Актуальність побудови функціонально-стійких МПД полягає у високій вартості загубленої інформації при сучасному збільшенні інформаційних потоків між абонентами мережі в умовах обмеженого фінансування і низького рівня захищеності комутаційного устаткування, ліній зв'язку й інформації від збоїв, відмовлень, а також навмисного втручання зловмисників. Властивість функціональної стійкості забезпечується як на етапі проектування шляхом реалізації збиткової оптимальної структури і параметрів системи, так і на етапі експлуатації, шляхом раціонального використання введеної надмірності [10]. У даній статті представлений метод визначення структури розподіленої інформаційної космічної системи для забезпечення її функціональної стійкості на етапі проектування.

Метою даної статті є дослідження методів синтезу структури МПД і розробка методу синтезу на основі критерію максимуму функціональної стійкості мережі.

Загальна характеристика задачі синтезу. Наявність сукупності критеріїв ефективності МПД ІКС визначає багатокритеріальний характер задачі її проектування і значно ускладнює розробку формальних методів. Для спрощення задачі проектування і її практичного рішення визначають показник ефективності, що підлягає оптимізації, а інші переводять до розряду обмежень. У залежності від основного показника ефективності (критерію оптимізації) розрізняють наступні варіанти постановки задач синтезу обчислювальних мереж [2]:

синтез мережі за критерієм мінімуму середнього часу затримки повідомлень у мережі τ_{CEP} при заданих надійності і вартості;

синтез мережі за критерієм мінімуму вартості при заданих показниках надійності і τ_{CEP};

синтез за критерієм максимуму надійності при заданих загальній вартості і τ_{CEP}.

Визначення функціонально-стійкої МПД ІКС. Головна вимога до обчислювальних мереж – є виконання мережею її основної функції – забезпечення абонентів мережі потенційною можливістю доступу до поділюваних інформаційних ресурсів, об'єднаних у МПД. Всі інші вимоги – продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, живучість, розширюваність і масштабованість, – пов'язані з якістю виконання цієї основної задачі.

Відповідно до цього, актуальною науковою задачею є підвищення ефективності функціонування інформаційних систем. Рішенню цієї задачі присвячено багато наукових праць [2 – 4]. Однак, на наш погляд, основна увага в них приділяється рішенню приватних задач, а саме – побудові резервованих інформаційно-керуючих систем, відмовостійких керуючих обчислювальних систем, адаптивних систем управління.

У цьому плані особливий інтерес становить побудова функціонально-стійких МПД, що дозволяють вирішувати покладені задачі при впливі потоку експлуатаційних відмовлень, навмисних ушкодженнях, втручанні в обмін і обробку інформації, а також при помилках обслуговуючого персоналу [5, 9]. Фактично функціональна стійкість складної технічної системи поєднує властивості надійності, відмовостійкості і живучості та характеризує здатність об'єкта до відновлення працездатного стану за рахунок використання надмірності. Для рішення проблеми раціонального введення надмірності і вирішується задача синтезу оптимальної структури МПД ІКС.

Постановка задачі синтезу. Проведений аналіз методів підвищення живучості і надійності структур мереж передачі даних [1, 2], а також результати вивчення процесів їхнього функціонування [3, 4, 8], дозволяють запропонувати наступний метод обґрунтованого вибору структури функціонально-стійкої МПД. Задача проектування структури системи передачі даних формулюється в такий спосіб.

Мається N абонентів, розташування яких задано географічними координатами. Обмін інформацією між абонентами здійснюється відповідно до матриці інтенсивностей $H = ||h_{ij}||$ розміром NxN, де h_{ij} – обсяг інформації, переданий від абонента і до абонента j за одиницю часу, $i = 1,\dots, N$, $j = 1,\dots, N$, $i \neq j$. Відома функція вартості МПД C і визначені припустимі витрати на її створення й експлуатацію $C_{ЗАД}$. Задані також необхідні імовірності зв’язності $P_{ЗАД}$. Потрібно визначити структуру мережі передачі даних, що має максимальний рівень функціональної стійкості $F_{МПД}$, який залежить від імовірності зв’язності P_{ij}, при заданих обмеженнях на витрати для створення й експлуатації мережі, а також інші параметри функціонування мережі.

Математична модель задачі виглядає наступним чином:

$$F_{МПД} = f(P_{ij}) \ \to \ \max, \qquad i, j = 1, \dots, N, \quad i \neq j; \tag{1}$$

$$C = \sum_i \sum_j C_{ij} \ (l_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}) \leq C_{ЗАД} \ ; \tag{2}$$

$$\forall \ \pi_{ij} \qquad P_{ij} \geq \ P_{ЗАД} \ ; \tag{3}$$

$$\varphi_{ij} \leq \rho_{ij} \ ; \tag{4}$$

$$\tau_{сер} \leq T_{max} , \tag{5}$$

де $F_{МПД}$ – функціонал якості, що максимізується; P_{ij} – імовірність зв’язності між парою (i, j) абонентів мережі; l_{ij} – довжина лінії зв'язку між абонентами (i, j).

Вираз (1) описує критерій оптимізації – максимум функціональної стійкості структури МПД. Як показник функціональної стійкості вибирається узагальнений показник, що характеризує зв’язність абонентів мережі (вершин графа) і залежний від імовірності зв’язності між кожною парою абонентів P_{ij}. Вирази (2) – (5) описують обмеження на параметри мережі для рішення оптимізаційної задачі.

Умова (2) означає, що сумарні наведені витрати на систему передачі даних із врахуванням довжини каналів, їхньої пропускної спроможності й обсягів переданої інформації не повинні перевищувати припустимої величини. Умова (3) визначає для всіх маршрутів π_{ij} значення імовірності зв'язності P_{ij}. Умова (4) для кожного каналу зв'язку з пропускною спроможністю ρ_{ij} обмежує обсяг потоку переданої інформації φ_{ij}. Умова (5) визначає середній час затримки повідомлення $\tau_{СЕР}$ у мережі.

Таким чином, після рішення задачі оптимізації буде знайдена розподілена структура МПД, що складається з N абонентів (список суміжності ребер графа структури МПД), що буде задовольняти критерію оптимізації (1) і обмеженням (2) – (5).

Особливості оптимізації структури МПД ІКС. Аналіз постановочної частини задачі оптимізації дозволяє відзначити наступні особливості її рішення:

1. Неможливо записати формалізований математичний вираз для цільової функції $F_{МПД}$, по виду якої можна було б вибрати один з відомих методів оптимізації [6]. Для обчислення показника $F_{МПД}$ можна розробити досить складний алгоритм. Однак жоден зі стандартних методів оптимізації в даному випадку не прийнятний – неможливо вказати чи обчислити напрямок зміни параметрів для пошуку екстремуму.

2. Основні параметри, які необхідно визначити при рішенні задачі оптимізації (число і вид зв'язків абонентів), лежать у дискретній області. Це припускає вибір одного з методів цілочисельної оптимізації [7].

3. Неможливо простежити чи усвідомити характер залежності показника функціональної стійкості $F_{МПД}$ від виду зв'язків абонентів (ребер графа). Тобто невідомо, як вплине введення ребра (i,j) чи (r,s) на значення $F_{МПД}$.

4. Для виконання повної оптимізації з метою точного рішення задачі необхідно здійснити повний перебір усіх структур, що складаються з N абонентів. На кожному кроці необхідно задавати нову структуру і проаналізувати її за виразами (1) – (5). Структура, що має найбільше значення показника $F_{МПД}$, і є шуканою. Даний метод повного перебору не прийнятний для великих N внаслідок високої трудомісткості обчислювальних алгоритмів.

5. Число всіх різних структур з N абонентів (вершин графа) обчислюється за факторіальними залежностями. Наприклад, для повнозв'язного неорієнтованого графа $G(V,E)$, $v_i \in V$, $e_{ij} \in E$, $i = 1, 2, \dots, N$, число всіх підграфів G_m, що складаються з m ребер, буде дорівнювати числу сполучень з числа всіх ребер повнозв'язного графа $M = \frac{N(N-1)}{2}$ по m:

$$G_m = C_M^m = \frac{M!}{m!\,(M-m)!}.$$

Число всіх різних структур визначається підсумовуванням по m:

$$G_N = \sum_{m=0}^{M} C_M^m = 2^M = 2^{N(N-1)/2}.$$

Таким чином, число всіх підграфів з 10 вершин дорівнює $G_{10} = 2^{45}$, з 20 вершин – $G_{20} = 2^{190}$, з 30 вершин – $G_{30} = 2^{435}$.

6. Через неможливість реалізації вичерпного повного перебору структур необхідно застосувати один з методів усіченого перебору структур з метою зменшення обчислювальних витрат.

Математична модель структури МПД ІКС. Структура МПД подається у вигляді неорієнтованого графу G(V, E), $v_i \in V$, $e_{ij} \in E$, i, j = 1, … , N, описуваного матрицею суміжності S:

$$S = \| s_{ij} \|, \quad s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{при } e_{ij} \notin E. \end{cases}$$

З огляду на особливості побудови МПД, деякі зв'язки і відповідні їм елементи a_{ij} необхідно зафіксувати:

$s_{ij} = 0$ – для умови відсутності петель у графі;

$s_{ij} = 1$ – для існуючих, раніше прокладених, чи зв'язків, що експлуатуються, (i, j), що будуть обов'язково присутні в проектованій структурі;

$s_{ij} = 0$ – для зв'язків, що неможливо прокласти по геодезичних чи технічних причинах;

$s_{ij} = 1$ – для зв'язків (i, j), що входять в ієрархічну структуру, описувану основним деревом графу.

Залишок елементів s_{ij} позначається як булеві змінні $x_i \in \{0,1\}$, i = 1,… , k, де k – число незафіксованих змінних s_{ij}.

При такому описі задача синтезу структури МПД трансформується в такий спосіб: необхідно визначити вектор $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*)$, $x_i^* \in \{0,1\}$, що описує надлишкові лінії зв'язку та повинен приводити в максимум функціонал якості $F_{МПД} = f(P_{ij}, X^*)$ при обмеженнях (2) – (5).

Постановка задачі дискретної оптимізації з булевими змінними.

Потрібно знайти оптимальний вектор $X^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$, такий, щоб

$$F(X) = C \cdot X = \sum_{j=1}^{n} c_j \cdot x_j \to \min, \quad X \in R^n,\ x_j \in \{0,1\},\ j = 1,\dots, n \qquad (6)$$

при обмеженнях

$$A \cdot X \le B \quad \text{або} \quad \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot x_j \le b_i, \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \qquad (7)$$

де X – вектор стану розмірності n, що складається з булевих змінних; $F(X)$ – функціонал якості, що характеризує основний показник оптимізації; $C = (c_1, \dots, c_n)$, $c_j > 0$ – вектор постійних коефіцієнтів розмірності n; $A = ||a_{ij}||$ – прямокутна матриця коефіцієнтів обмежень розмірністю $(m \times n)$; $B = (b_1, \dots, b_m)$ – вектор правих частин обмежень.

Введемо в розгляд наступні поняття.

P – множина можливих рішень – множина булевих векторів X, кожний з який складається з n нулів чи одиниць. $|P| = 2^n$.

V – множина припустимих рішень $V \subseteq P$ – множина векторів X, що задовольняють обмеженням (7).

H – множина оптимальних рішень $H \subseteq V$ – множина векторів X, що приводять функціонал якості (6) до екстремуму.

Частковим *l-рішенням* $(1 \le l \le n - 1)$ задачі (6), (7) називається будь-який упорядкований набір $X' = (x_1', \dots, x_l')$, що складається із фіксованих l змінних.

Підсистемою $(l + 1)$-го порядку для часткового *l-рішення* $X' = (x_1', \dots, x_l')$ називається система лінійних нерівностей щодо незафіксованих змінних $x_{l+1}, \dots, x_n$, яка отримана перетворенням з (7):

$$\sum_{j=l+1}^{n} a_{ij} \cdot x_j \le b_i - \sum_{j=1}^{l} a_{ij} \cdot x_j', \quad i = 1, \dots, m, \quad x_j \in \{0,1\}. \qquad (8)$$

Перед виконанням алгоритму пошуку оптимального рішення обчислюється допоміжна матриця $Z = ||z_{ij}||$ розмірністю $(m \times n)$:

$$z_{ij} = \sum_{k \in I_{ij}^-} a_{ik}, \quad i = 1, \dots, m, \qquad (9)$$

де I_{ij}^- – підмножини індексів негативних елементів матриці A, що задовольняють умовам:

$$I_{ij}^- = \{k\} \; / \; a_{ik} < 0, \quad k \in \{j, \dots, n\}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Метод оптимізації є комбінаторним і полягає в спрямованому частковому переборі елементів кінцевої множини P. Суть пошуку оптимального вектора полягає в наступному. Вибирається напрямок пошуку убік збільшення від нульового вектора. Обчислюється *l-рішення* мінімальної довжини, що не задовольняє (8). Усі вектори X, що включають у себе знайдене *l-рішення* відкидаються, тому що не задовольняють обмеженням (7) і не входять до множини припустимих рішень V. Для скорочення перебору враховується позитивність коефіцієнтів цільової функції

c_i і використовується допоміжна матриця Z. Пропонований алгоритм використовує ідеї усіченого перебору й аналізу множини припустимих рішень [7].

Опис алгоритму пошуку оптимальної структури МПД ІКС.

Крок 1. Вибирається мінімальний у лексикографічному відношенні нульовий вектор

$$X = (x_1, \ldots, x_n)/x_j = 0,\ j = 1, \ldots, n,$$

який є початковим для проведення пошуку оптимального рішення.

Призначаємо $t: = 1$.

Крок 2. Перевірка наявності припустимих рішень.

Якщо для всіх $i = 1, \ldots, m$ виконується умова

$$b_i \geq z_{i1}, \tag{10}$$

то переходимо до кроку 3. У противному разі переходимо до кроку 8.

Крок 3. Досліджується вектор $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, у якому усі $x_j = 0$ при $j > t$.

Змінюючи l від t до $n - 1$, шукаємо $l' = \min\{l\}$, при якому підсистема $(l' + 1)$-го порядку для часткового *l'-рішення* не має рішення:

якщо хоча б для одного $p = 1, \ldots, m$ виконується умова

$$b_p - \sum_{j=1}^{t} a_{pj} x_j < z_{p\,l+1}, \tag{11}$$

то виконуються наступні дії:

– приймається $l' := l$; $t := l'$;

– усікається вектор X до довжини t: $X' = (x_1, x_2, \ldots, x_t)$;

– робиться висновок, що X' не задовольняє обмеженням (7) і всі можливі доповнення його до повного вектора X також не задовольняють обмеженням (7);

– перехід до кроку 4.

У випадку, якщо умова (11) не виконується для всіх $l = t, \ldots, n{-}1$, то робиться висновок, що вектор $X = (x_1, x_2, \ldots, x_{n-1})$ може входити в множину V і виконується перехід до кроку 5.

Крок 4. У випадку, якщо всі $x_j = 1$ у досліджуваному векторі $X' = (x_1, x_2, \ldots, x_t)$, то переходимо до кроку 9. У противному разі виконується визначення нового лексикографічного значення вектора X'' для вектора $X' = (x_1', x_2', \ldots, x_t')$: якщо $x_t' = 0$, то прийма $x_t'' := 1$. Якщо $x_t' = 1$, то обчислюємо $k = \max\{j\} / j \in \{1, \ldots, t\}, x_j' = 0$ (тобто k – індекс самого правого нуля у векторі X'). Припускаємо $x_k'' := 1$; $x_j'' := 0$ для $j = k + 1, \ldots, t$; $t: = k$.

Після одержання нового лексикографічного значення X'', доповнюємо його нулями до довжини $n-1$ і отримуємо досліджуваний вектор X. Перехід до кроку 3.

Крок 5. Перевірка належності досліджуваного вектора $X=(x_1, \ldots, x_{n-1})$ з доповненням $x_n=0$ множині припустимих рішень V:
якщо для всіх $i=1, \ldots, m$ виконується умова

$$b_i-\sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} x_j \geq 0, \tag{12}$$

то робиться висновок, що досліджуване рішення $X=(x_1, x_2, \ldots, x_{n-1}, 0) \in V$ і переходимо до кроку 7.

Якщо умова (12) не виконується хоча б для одного $i=1, \ldots, m$, то переходимо до кроку 6.

Крок 6. Перевірка належності досліджуваного вектора $X=(x_1, \ldots, x_{n-1})$ з доповненням $x_n=1$ множині припустимих рішень V:

приймаємо $x_n:=1$;

якщо для всіх $i=1, \ldots, m$ виконується умова

$$b_i-\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \geq 0, \tag{13}$$

то робиться висновок, що досліджуване рішення $X=(x_1, x_2, \ldots, x_{n-1}, 1) \in V$ і переходимо до кроку 7.

Якщо умова (13) не виконується хоча б для одного $i=1, \ldots, m$, то приймаємо $t:=n-1$ і переходимо до кроку 4.

Крок 7. При одержанні припустимого рішення $X^*=(x_1^*, \ldots, x_n^*)$ запам'ятовуємо його як оптимальне.

У випадку, якщо припустиме рішення X^* отримане вперше, у систему обмежень (7) вводиться додаткове обмеження:

$$\sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_j \leq b_{m+1}, \tag{14}$$

де $b_{m+1}=\sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_j^*-\delta$, δ – мінімальне збільшення функціонала (6) при зміні вектора X в одному розряді:

$$\delta=\min \{|c_i-c_j|\} \quad \text{для } i, j=1, \ldots, n;\ i \neq j \ldots$$

Виконується коректування матриці коефіцієнтів обмежень A: додається $(m+1)$-й рядок:

$$a_{m+1, j}:=c_j, \qquad j=1, \ldots, n \ldots$$

Виконується коректування матриці Z: додається $(m+1)$-й рядок:

$$z_{m+1, j}:=0, \qquad j=1, \ldots, n \ldots$$

Значення m збільшуємо на одиницю: $m := m + 1$.

У випадку, якщо отримане повторне припустиме рішення X^*, то права частина обмеження (14) коректується і заміняється величиною:

$$b_m = \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_j^* \ . \qquad (15)$$

Це дозволяє виключити рішення, що належать множині V і не належать множині оптимальних рішень.

Призначаємо $t := n - 1$ і переходимо до кроку 4.

Крок 8. Задача не має припустимих рішень – множина $V = \varnothing$. Робота алгоритму припиняється, задача не має рішень.

Крок 9. Роботу алгоритму завершено. Оптимальним рішенням X^* вихідної задачі є останнє, запам'ятоване на кроці 7 значення припустимого рішення X^*.

Аналіз рішення оптимізаційної задачі. За наведеним алгоритмом проведено моделювання пошуку оптимального рішення. Аналіз прогону тестових задач показує, що:

алгоритм досить швидко сходиться і має кінцеве число ітерацій;

число ітерацій, а отже і час рішення алгоритму, сильно залежить від числа обмежень (7);

у порівнянні з повним перебором використання даного алгоритму бажано проводити при розмірності задачі $n > 20$;

результати рішення тестових задач цілком збігаються з результатами рішення повним перебором, що підтверджує вірогідність отриманих результатів.

Висновки. У результаті проведених досліджень запропонований метод синтезу структури мережі передачі даних ІКС. Як критерій оптимізації прийнятий максимум функціональної стійкості МПД. Виходячи з особливостей парирування відмов і ушкоджень функціонально-стійкими МПД, як показник функціональної стійкості обґрунтовано обрана згортка матриці імовірностей зв'язності $||P_{ij}||$ між кожною парою вершин мережі. Інші показники ефективності функціонування МПД – вартість проектування й експлуатації мережі C, середній час затримки повідомлень у мережі $\tau_{СЕР}$, показники зв'язності P_{ij} – складають обмеження при рішенні поставленої оптимізаційної задачі.

Запропоновано ефективний алгоритм рішення задачі дискретної оптимізації з булевими змінними, який дозволяє за прийнятний машинний час відшукати оптимальне рішення – множину надлишкових ребер графу структури ІКС. Однак, основною складністю застосування запропонованого методу синтезу структур є труднощі зведення функціонала якості й обмежень до лінійних функцій у залежності від елементів матриці суміжності графу структури.

Запропонований метод може бути застосований для синтезу структур різних розподілених інформаційних систем, які розміщені на території регіону чи цілої держави, та які дозволяють проведення реконфігурації і деградації структури.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Сети ЭВМ / В.М. Глушков, А.А. Калиниченко, В.Г. Лазарев, В.И. Сифонов / Под ред. В.М. Глушкова. – М.: Связь, 1977. – 280 с.*
2. *Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.*
3. *Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.*
4. *Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб: изд-во "Питер", 2000. – 672 с.*
5. *Артюшин Л.М., Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.*
6. *Большие технические системы: проектирование и управление / Л.М. Артюшин, Ю.К. Зиатдинов, И.А. Попов, А.В. Харченко. Под ред. И.А. Попова. – Х.: Факт, 1997. – 400 с.*
7. *Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. – К.: Наук. думка, 1985. – 384 с.*
8. *Пономаренко Л.А., Щелкунов В.И., Скляров А.Я. Инструментальные средства проектирования, имитационного моделирования и анализа компьютерных сетей. – К.: Наук. думка, 2002. – 508 с.*
9. *Евстигнеев Е.А., Сухоруков Ю.С. Об основных направлениях обеспечения устойчивости автоматизированного управления войсками в операциях (бою) // Военная мысль. – 1999. – № 9. – С. 42 – 50.*
10. *Машков В.А., Барабаш О.В. Самоконтроль и самодиагностирование модульных систем по принципу блуждающего диагностического ядра // Электронное моделирование. – К.: НАН Украины, 1995. – Т. 19, № 1. – С. 41 – 49.*

Надійшла 6.10.2003

***БАРАБАШ Олег Володимирович**, канд. техн. наук, доцент, докторант Національної академії оборони України. В 1986 році закінчив Київське вище військове авіаційне училище. Область наукових інтересів – надійність обчислювальних мереж.*