

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 681.5(042.3)

<http://orcid.org/0000-0001-6473-1329>
<http://orcid.org/0000-0001-5157-4264>

О.В. СЕМКО, В.В. СЕМКО

РОЗРОБКА ФОРМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ МАРШРУТИЗАЦІЄЮ В КОНФЛІКТУЮЧИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ВАРІАТИВНОЇ ТОПОЛОГІЇ

***Анотація.** Процеси функціонування гарантоздатних самоорганізуючих сенсорних мереж варіативної топології потребують створення новітніх систем інтелектуального управління. Враховуючи те, що елементи сенсорних мереж мають властивість переміщення в просторі параметрів за умов обмежень, невизначеностей, змінної топології, зовнішніх і внутрішніх впливів, визначальним є вибір моделі опису процесу управління маршрутизацією потоків даних. Зазначена задача розглянута як задача дискретної динамічної оптимізації. Параметри функціонування мережі, що визначають переміщення елементів в просторі функціонування, характеристики функціонування каналів інформаційної взаємодії вузлів і топологія мережі мають входити в опис функції ціни при синтезі і виборі рішень щодо маршрутизації потоків даних. Методика дослідження включає розробку методу формального опису топології у вигляді математичної моделі і нотації (мови) опису процесів функціонування сенсорної мережі; теоретико-множинної моделі процесів взаємодії елементів мережі; моделі рішення задачі оптимального управління маршрутизацією потоків даних для розподіленої системи інтелектуального управління. Інтегрально-топологічні методи дослідження та аналізу функціонування сенсорних мереж у фізичному і віртуальному просторі дозволяють виявити характеристики і синтезувати модель взаємодії елементів гетерогенної мережі.*

***Ключові слова:** сенсорна мережа, система інтелектуального управління, модель конфлікту, передача даних, варіативна топологія.*

DOI: 10.35350/2409-8876-2019-14-1-5-19

Вступ

Сучасне суспільство все більше стає залежним від якості сучасних інформаційно-телекомунікаційних послуг, що є наслідком стрімкого розвитку інформаційних технологій (ІТ). Важливими показниками якості таких послуг є рівень надійності і безпеки сервісів та ІТ-систем, що використовують ці послуги. Слід також враховувати те, що недостатній рівень надійності і безпеки ІТ, комп'ютерних систем і сенсорних мереж (СМ)

призводить до втрат за рахунок впливу на функціонування критичних компонент технічних систем (ТС).

Сервіс-орієнтована СМ є розподіленою самоорганізованою мережею збирання і передачі даних до певного хоста або до зовнішньої мережі через інші сенсори з використанням бездротового каналу передачі даних. Така мережа, як правило, має радіуси взаємодії з вузлами, які можуть перевищувати гранично припустимі. В такому разі вибір топології СМ має безпосередній вплив на вибір протоколів, параметрів каналів взаємодіючих вузлів та маршрут передачі даних (ПД).

Тому актуальним є дослідження моделей СМ варіативної топології (ВТ) і методів інтелектуального управління маршрутизацією ПД за умов забезпечення гарантоздатності мереж.

1. Загальна характеристика проблеми управління маршрутизацією

Гарантоздатні сервіс-орієнтовані СМ мають набір первинних властивостей (атрибутів), що забезпечують надання послуг, яким можна гарантовано довіряти згідно з моделлю їх функціонування [1, 2].

Проблемам дослідження властивостей та характеристик, що впливають на процеси функціонування і управління сучасними мережами передачі даних, присвячено роботи [3, 4].

Методи проектування телекомунікаційних мереж, їх систем управління, ПД, новітніх технологічних рішень розглядалися в роботах [5, 6].

За їх висновками встановлено, що процеси функціонування гарантоздатних самоорганізуючих СМ варіативної топології потребують створення новітніх систем інтелектуального управління [7, 8].

Застосування методів і моделей вирішення задач вибору з використанням методів динамічної дискретної оптимізації досліджувались в роботах [9, 10].

Враховуючи те, що елементи СМ мають властивість переміщення в просторі параметрів в умовах обмежень, невизначеностей, змінної топології і зовнішніх впливів, визначальним є вибір моделі опису процесу управління маршрутизацією ПД [11], [12]. У такому разі зазначена задача може бути розглянута як задача дискретної динамічної оптимізації, а параметри функціонування СМ, що визначають переміщення елементів в просторі, характеристики функціонування каналів інформаційної взаємодії та топологія мережі мають входити в опис функції ціни [13].

Сучасні системи інтелектуального управління (СІУ) самоорганізованими гарантоздатними СМ і процесами, що обумовлені їх функціонуванням, структурно та функціонально є складними і багатомірними. Їх прагматична сутність обумовлюється перш за все наявністю взаємозв'язків, правил та відношень як між власне внутрішніми компонентами, так і з компонентами зовнішнього середовища [14]. Взаємозв'язки між компонентами описуються, як правило, моделями, які відображають специфіку взаємодії цих компонент, елементів та підсистем із зовнішнім і внутрішнім середовищем в умовах невизначеностей, довільних обмежень та конфлікту [15].

Невизначеності обумовлені неоднозначністю, неповнотою або відсутністю даних про:

– вектор стану і параметри функціонування СІУ;

- неконтрольовані завади вимірювання значення параметрів;
- зовнішні та внутрішні збурення;
- властивості простору існування СМ;
- наявність об'єктів, які знаходяться в стані конфлікту з об'єктом управління (ОУ).

Під конфліктом в цьому сенсі розуміють явище взаємодії по-різному цілеспрямованих сторін – об'єктів технічних систем (ТС) і технічних ергатичних систем (ТЕС), які:

- або мають складний опис, що не може бути використаним практично;
- або взагалі не можуть бути повною мірою описаними ні формально, ні вербально.

2. Загальна постановка задачі, об'єкт, предмет та мета досліджень

Проблема, процедура вирішення якої розглядається в роботі, полягає у розробці моделі, яка є заснованою при створенні методу інтелектуального управління маршрутизацією в СМ ВТ, які побудовані на основі сервіс-орієнтованої архітектури в умовах конфлікту, існуючих обмежень та невизначеностей.

Виникненню цієї проблеми сприяє низка протиріч. По-перше – це протиріччя, що обумовлені обмеженими можливостями традиційних підходів щодо рішення конфліктів в ТС і ТЕС. По-друге, протиріччя, що обумовлені застосуванням існуючих моделей й методів синтезу оптимальних рішень і управління конфліктуючими системами та об'єктами в реальному часі, а саме СМ. Проблема може бути вирішена за рахунок розроблення моделей і методів, які використовують упорядковану послідовність процесів синтезу маршрутів передачі даних в СМ. Головною вимогою до зазначених методів і моделей є забезпечення гарантоздатності при управлінні в реальному часі маршрутизацією в сервіс-орієнтованій СМ ВТ при рішенні конфлікту в умовах обмежень і невизначеностей.

Об'єкт дослідження – моделі процесів оптимального управління багатомірними інформаційними об'єктами варіативної топології в умовах конфлікту, обмежень та невизначеностей, а саме маршрутизацією ПД в СМ ВТ.

Мета дослідження – вибір та обґрунтування формальної моделі функціонування СІУ маршрутизацією ПД в гарантоздатних сервіс-орієнтованих СМ ВТ в умовах конфлікту взаємодії вузлів, обмежень та невизначеностей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити метод формального опису топології СМ у вигляді математичної моделі і нотації (мови) опису процесів функціонування мережі;
- розробити теоретико-множинну модель (ТММ) процесів взаємодії елементів СМ;
- визначити функцію ціни як критерій оптимальності за умов конфлікту, обмежень та невизначеностей;
- розробити модель рішення задачі оптимального управління маршрутизацією ПД для гарантоздатної розподіленої СІУ СМ ВТ.

3. Методика і результати досліджень

Математична модель СМ ПД може бути представлена зв'язаним графом:

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де V – множина вузлів графа, що представляє СМ; E – множина ребер графа, що з'єднує вузли і відображає можливий маршрут ПД.

Кожному ребру $e_{ij} \in E \forall \{i, j\} \in V$ графа G поставлено у відповідність невід'ємне число $c_{ij} \geq 0$, що визначає пропускну здатність ребра як функції ціни при передачі ПД. Введемо таке поняття ПД f між вершинами s і t , яка є достатньою функцією на ребрах графа G $f_{ij} \geq 0$ за умови того, що ПД не накопичується в проміжних вузлах мережі між вузлами s і t , тобто:

$$\sum_k f_{ki} = \sum_j f_{ij}, \forall i \in V, i \neq \{s, t\}, \quad (2)$$

і не перевищує пропускну спроможність каналу ПД, а саме $f_{ij} \leq c_{ij}$ і $e_{ij} \in E$. Залишкова пропускну здатність ребра e_{ij} визначається як різниця пропускну здатності ребра і ПД по ньому, тобто $c_{ij}^f = c_{ij} - f_{ij}$. У такому разі з графу мережі G отримуємо залишкову мережу $G' = (V, E^f)$, в якій залишаються ребра з додатною залишковою пропускну спроможністю.

У відповідності до співвідношення (2) виникнення процесу ПД в СМ визначається як поява заявки в мережі між парою вершин з множини $\{\{s_1, t_1\}, \dots, \{s_n, t_n\}\}$ вузлів. Час життя заявок обмежений протяжністю процесу їх обслуговування за умови встановленого маршруту ПД між вузлами. Тим самим забезпечується вивільнення пропускну спроможності ребер мережі за умови виконання запиту на обслуговування заявки і визначення маршруту ПД між вузлами. Після закінчення часу життя заявка скидається, звільняючи відповідну пропускну здатність ребер мережі. Множина ПД між кожною парою вузлів через вузол за маршрутом є продуктом V_m вузла $\{s_m, t_m\}$.

В якості обмеженого ресурсу СМ, що визначає функцію ціни, обрано пропускну спроможність каналів зв'язку, які визначають ребра (дуги) моделі мережі G .

Видалення з множини ребер розриває мережу на кілька незв'язних між собою частин таким чином, що вузол-відправник і вузол-отримувач ПД знаходяться в різних частинах мережі. Таким чином, модель G визначає множину мінімальних розрізів k_m кожного продукту v_m та пропускну спроможність цих розрізів R_m . В такому разі вирішення задачі управління маршрутизацією ПД можна представити як рішення задачі динамічної дискретної оптимізації при взаємодії конфліктуючих вузлів СМ ПД з використанням евристичного алгоритму інтегрального усікання варіантів [16].

У такому разі рішення задачі синтезу і вибору маршруту ПД є рішенням задачі пошуку маршруту найменшої вартості. Чисельне значення вартості присвоюється ребрам мережі в залежності від кількості мінімальних розрізів продукту, пропускної спроможності мережі і кількості елементів (*hops*) синтезованого маршруту.

У залежності від способу визначення вартості дуг моделі G для визначення функції ціни застосовується субоптимальний мінімально-розрізний алгоритм, що орієнтований на синтез і вибір маршруту ПД. У такому разі маршрут ПД будується із застосуванням ребер граф-моделі G , які мають найбільший резерв пропускної спроможності каналів і мінімальну кількість елементів синтезованого маршруту. Таким чином, алгоритм синтезу і вибору маршруту ПД забезпечує обслуговування найбільшої кількості заявок на передачу даних в мережі.

Визначимо модель M взаємодії елементів СМ ВТ за умови замкненості простору функціонування СМ ВТ Q з границею $\Gamma_{np}(Q)$. При цьому варіативність топології мережі пов'язана з кількістю активних вузлів і гетерогенністю CV . Таким чином, варіативність топології і гетерогенність мережі обумовлює можливості маршрутизації ПД з використанням її сегментів Internet і Intranet, що відповідає базовій еталонній моделі взаємодії відкритих систем (модель *OSI*).

У такому разі модель M взаємодії вузлів СМ в топологічній схемі, яка відображає наявність ребер графу мережі (1), має вигляд:

$$M = \bigcup_{i=1}^N M^i, \quad (3)$$

де N – кількість вузлів СМ; M^i – часткова модель i -го вузла СМ, яка відображає кількісні характеристики зв'язків з іншими вузлами мережі – ребрами графу G і може бути представлена у вигляді:

$$M^i = \langle B^i, F^i, \Gamma_{np}^i \rangle, \quad (4)$$

а множини Γ_{np}^i визначають граматику та правила утворення співвідношень при взаємодії вузлів мережі в просторі Q :

$$\Gamma_{np} = \bigcup_{i=1}^N \Gamma_{np}^i. \quad (5)$$

Тобто в загальному випадку за співвідношеннями (3) і (4) вводиться поняття мови для формального опису процесів, що пов'язані з вирішенням задачі синтезу маршруту ПД в СМ в просторі Q .

У загальному випадку мова є нескінченною множиною, а нескінченні об'єкти важко задати, наприклад, простим перерахуванням елементів [17], [18]. Будь-який кінцевий механізм задавання мови є граматикою Γ_{np}^i .

У співвідношеннях (4) і (5) базис B^i визначає потенційні можливості взаємодії i -го вузла СМ з іншими вузлами мережі при визначенні можливостей маршрутизації і кількісних характеристик зв'язків (ребер графу мережі G) в просторі Q :

$$B^i = (X^i, Y^i, A^i), \quad (6)$$

де X^i – множини потенційно можливого місця знаходження i -го вузла мережі в просторі Q , які визначаються як множини керованих і напівкерованих станів в просторі параметрів у відповідності з припущенням невизначеності та прогнозу переміщення i -го вузла;

Y^i – множина, яка визначається характеристиками переміщення i -го вузла в просторі керованих і напівкерованих станів і враховує наявні ресурси управління в просторі станів мережі. Множина Y^i i -го вузла СМ вміщує елементи, що відображають зміни динамічних характеристик маршрутизації (щільності ПД по елементу моделі G) для i -го вузла мережі у відповідності з припущенням A^i . Припущення A^i є множиною формальних відображень зв'язку параметрів, включаючи правила і відношення, що враховує прогноз, невизначеність, динаміку та небезпечність переміщення i -го вузла в просторі функціонування СМ в процесі ПД. Множина F^i вміщує формальне відображення прогнозу, динаміки і безпечності маршруту ПД у віртуальному просторі функціонування мережі Q з базисом B^i для i -го вузла СМ.

Для СМ в цілому невизначеність стану можна описати співвідношенням: $A = \bigcup_{i=1}^N A^i$.

Значення F^i в співвідношенні (4) визначає властивості i -го вузла при побудові маршруту ПД в просторі Q :

$$F^i = (f_x^i, f_c^i, d^i), \quad (7)$$

де f_x^i – згладжені значення координат для i -го вузла в просторі Q для кожного моменту ПД; f_c^i – згладжені значення першої похідної (вектора швидкості зміни координат) при переміщенні вузла в просторі Q ; d^i – припустима відстань взаємодії i -го вузла із суміжними вузлами мережі, яка враховує зміну параметрів функціонування відповідних каналів ПД (ребер графу мережі G в просторі Q).

У загальному вигляді для i -го вузла мережі значення d^i може бути визначено як:

$$d^i = d_{зад}^i + \Delta d^i, \quad (8)$$

де d_{zad}^i – припустима відстань взаємодії для i -го вузла при визначенні маршруту ПД; Δd^i – невизначеність, яка враховує динамічність i -го вузла і параметрів каналів ПД.

У загальному вигляді значення Δd^i для k -мірного простору Q визначається співвідношенням:

$$\Delta d^i = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left(\ddot{x}_j^i\right)^2 \frac{\Delta t^2}{2}} + d_{ij}^k + \Delta d_{ij}^k, \quad (9)$$

де \ddot{x}_j^i – друга похідна відповідної j -ї координати i -го вектора швидкості f_c^i i -го вузла; Δt – інтервал часу вимірювання; d_{ij}^k – корегуюча віртуальна відстань до j -го вузла СМ за рівнем сигналу, що надходить до вузла СМ ($RSSI$); Δd_{ij}^k – корегуюча віртуальна відстань до j -го вузла СМ, що враховує властивості каналу ПД та завантаженість обчислювальних ресурсів вузла мережі.

Визначивши величину додаткового затухання в інтелектуальному перетворювачі (ІП) вузла СМ, обчислюється значення корегуючої відстані від i -го вузла до інших j -х вузлів мережі:

$$d_{ij}^k = \left(d_{ij}^l\right)^{\frac{k-\Delta}{k}} \left(\frac{4\pi f}{c}\right)^{\frac{-\Delta}{k}}, \quad (10)$$

де d_{ij}^k – корегуюча відстань від i -го вузла до інших j -х вузлів мережі, що визначена за методом уточнення місцезнаходження по індикації рівня $RSSI$ сигналу; d_{ij}^l – локальна відстань до j -х вузлів мережі; k – коефіцієнт послаблення; Δ – додаткове затухання; f – частота сигналу; c – швидкість світла.

Виходячи з формального опису математичних моделей взаємодії вузлів СМ (3)–(10), визначимо мінімально-перебірну процедуру синтезу і вибору рішення на основі методу інтегрального усікання варіантів [16].

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = \sum_{i=1}^k C_i \lambda_i, \\ \lambda_i = \frac{\Delta u_i}{\sup |u_i|}, \forall \lambda_i \in \lambda, \\ \sum_{i=1}^k C_i = 1. \end{array} \right. \quad (11)$$

Критерій оптимальності Φ у співвідношенні (11) є адитивним критерієм вибору. Значення коефіцієнтів C_i визначається для кожного виду конфліктів окремо. λ_i визначає «витрати на управління» параметрами функціонування СМ згідно з обраною стратегією на множині ребер граф-моделі СМ, що відповідає формальній моделі (3) за рахунок управління u_i для i -го елемента маршруту ПД в просторі Q .

У такому разі задачу синтезу управління маршрутизацією можна сформулювати як конфлікт взаємодії вузлів СМ графу мережі G в просторі Q :

$$K = \langle M, A, \Gamma_{np}, G, \mu \rangle, \quad (12)$$

а процедуру синтезу стратегій рішення конфлікту μ згідно з принципом оптимальності χ , який реалізовує вимоги критерію Φ , можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} K = \langle M, A, \Gamma_{np}, G, \mu \rangle, \\ \lambda K = \mu. \end{cases} \quad (13)$$

Вибір оптимальної стратегії рішення конфлікту μ^* із врахуванням правила зупинки $\Gamma_{зуп}$ формулюється у вигляді:

$$\mu^* = \inf_{\chi, \Gamma_{зуп}} K. \quad (14)$$

Співвідношення (11)–(14) фактично є постановкою задачі опису конфлікту взаємодії об'єктів та синтезу оптимального рішення в просторі Q .

Відповідно до моделі СМ ПД (1) при синтезі і відборі стратегії управління маршрутизацією визначається додатна функція ціни (2).

Найбільш значущим параметром, що характеризує функціонування каналу ПД при взаємодії вузлів СМ, є залишкова пропускна здатність каналу передачі даних між вузлами мережі, який відображає ребро графа мережі. Тим самим за наявності залишкової пропускної здатності каналу зв'язку можна в якості додаткового критерію відбору визначити сумарну затримку сигналу в маршруті ПД, що визначається значенням Δd_{ij}^k у співвідношенні (9).

Враховуючи нестационарність значення часу затримки пакетів даних, що технологічно забезпечують пакетну ПД при функціонуванні мережі, можна розглядати дві складові часу затримки:

- затримку на проміжних вузлах СМ ПД;
- затримку, яка обумовлена станом фізичного середовища передачі пакетів даних у відповідному протоколі інкапсуляції моделі *OSI*.

Хоча протокол IP не є надійним протоколом, набір протоколів TCP/IP забезпечує відправку повідомлень навіть в разі виникнення будь-яких помилок. Ці повідомлення відправляються за допомогою протоколу мережевого рівня ICMP (Internet Control Message Protocol – протокол

управляючих, або контрольних, повідомлень) і його повідомлень (рис. 1). Протокол ICMP забезпечує підтвердження наявності вузла мережі, проміжок часу існування (життя) пакету, переадресацію маршрутів, призначення та недоступність послуги протоколу.

IP-датаграма					
		Біт 0–7	Біт 8–15	Біт 16–23	Біт 24–31
Заголовок IP (20 байтів)		Версія/МГП	Тип обслуговування	Довжина	
		Час життя (TTL)	Протокол	Контрольна сума	
		Похідна IP-адреса			
		IP-адреса отримувача			
Заголовок ICMP (8 байтів)		Тип повідомлення	Код	Контрольна сума	
		Дані заголовку			
Корисне навантаження ICMP (необов'язково)		Дані корисного навантаження			

Рисунок 1 – Датаграма протоколу ICMP (Internet Control Message Protocol)

Разом з тим функція переадресації в протоколі ICMP діє тільки в тому випадку, якщо вузол-відправник знаходиться в тій же фізичній мережі, що і шлюз маршрутизатора, що передбачається в мережах з централізованим управлінням маршрутизацією. У такому випадку для CM з децентралізованим управлінням маршрутизацією ПД виникають проблеми формування топології гетерогенних мереж.

При проходженні пакетів ICMP-протоколу через кожен вузол CM значення параметра TTL (Time to live) зменшується на одиницю або на кількість секунд, що визначають час проходження пакету. Таким чином, значення параметра TTL дозволяє контролювати кількість проміжних вузлів і час проходження даних в CM на маршруті ПД, попереджує можливість створення петлі маршруту, а також перехоплення пакетів.

Важливою особливістю ICMP-протоколу є можливість використання «ехо-запитів» і «ехо-відповідей» для вимірювання часу проходження ICMP-пакетів при програмній емуляції утиліти перевірки цілісності і якості з'єднань в мережах на основі протоколу NCP/IP - Ping операційних систем. Змінюючи розмір буферу під час емуляції утиліти Ping, можна визначити оптимальний розмір ICMP-пакетів при управлінні маршрутизацією ПД в CM. Таким чином забезпечується потрібна швидкість ПД між вузлами і

запобігання конфліктам взаємодіючих вузлів СМ за рахунок оптимального динамічного управління навантаженням в каналах ПД згідно з моделлю G.

Визначення параметрів, що забезпечують оптимальну безконфліктну взаємодію вузлів СМ ВТ при управлінні маршрутизацією ПД, забезпечується на рівні системних програмних утиліт. Такі утиліти істотно відрізняються в платформах операційних систем (ОС) UNIX (RAW sockets – необроблені, «сирі» сокети) і в ОС Windows всіх версій (ICMP API) та потребують для використання права адміністратора обчислювальної системи (права користувача з привілеями).

Виходячи з можливостей існуючого програмного забезпечення сучасних ОС і протоколів моделі OSI, можна визначити основні параметри управління пропускнуою спроможністю і гарантоздатністю СМ ВТ за умови того, що відправка ICMP-пакетів за заданою адресою вузла мережі не буде перервана вузлом-відправником. До таких параметрів відносяться: кількість відправлених «ехо-запитів», розмір буферу повідомлення, фрагментація ICMP-пакетів, TTL – час «життя» пакетів, тип обслуговування пакетів, запис маршруту ПД для вказаної кількості переходів (hops), часова відмітка вказаної кількості переходів, детермінованості і кількості вузлів та ребер граф-моделі СМ ВТ, значення припустимої затримки пакетів при очікуванні затримки відповіді вузла-отримувача пакета.

Вирішення задачі оптимального управління навантаженням на кожному вузлі маршруту ПД в СМ ВТ забезпечується за алгоритмом, який використовує можливості протоколу ICMP:

1) завантаження бібліотеки методів, що забезпечують функціонування протоколу ICMP;

2) ініціація програмного інтерфейсу для забезпечення обміну даними між процесами програмного сокету, що забезпечує взаємодію програмного забезпечення (ПЗ) з модулями операційної системи, які забезпечують функціонування базової моделі стеку мережевих протоколів – OSI (open systems interconnection basic reference model);

3) визначення IP-адреси вузла СМ, який визначає кінець ребра ланки маршруту, що з'єднує взаємодіючі вузли СМ;

4) опрацювання програмної події в разі відсутності кінцевого вузла для побудови ребра графу СМ (подія зміни топології мережі);

5) визначення параметрів вимірювання характеристик функціонування каналу ПД при взаємодії вузлів СМ (кількість відправлених ехо-запитів, розмір буферу повідомлення, ознака фрагментації ICMP-пакетів, час «життя» пакетів TTL, тип обслуговування пакетів, значення припустимої затримки пакетів при очікуванні затримки відповіді вузла-отримувача пакета);

6) обчислення оптимального значення характеристик функціонування каналу ПД при взаємодії вузлів СМ ВТ відповідно до функції ціни.

Обчислення навантаження на канал ПД визначається співвідношенням:

$$\rho = \frac{\tau_{10}}{RTT}, \quad (15)$$

де $\tau_{10} = 800L_f$ – час використання інтерфейсу кадром (нс), що передається, в макропакеті розміром L_f байтів; RTT – математичне очікування часу оберту ехо-запиту.

Слід зазначити, що при формуванні операційною системою вузла-відправника декількох потоків ехо-запитів навантаження на його мережевий інтерфейс зростає. При цьому спостерігається лінійна залежність навантаження (15) від кількості надсилаємих потоків ехо-запитів відповідно до їх кількості.

Час формування ехо-запитів лінійно залежить від кількості потоків. Якщо сумарний час передачі мережним адаптером вузла-відправника потоку ехо-запитів менше часу формування, то навантаження в каналі ПД СМ лінійно зростає, а мережний адаптер з точки зору продуктивності є «вузьким місцем», що створює чергу ехо-запитів. Знаходження в черзі підвищує значення RTT для кожного ехо-запиту, зменшуючи навантаження на канал ПД.

При рішенні задачі синтезу і вибору стратегії управління маршрутизацією ПД в конфліктуючій СМ ВТ враховуються основні параметри, що характеризують поточний стан продуктивності мережі, можливості оптимального управління її пропускною спроможністю за умов забезпечення гарантоздатності.

Забезпечення гарантоздатності при взаємодії вузлів СМ ВТ здійснюється із застосуванням двох концептуальних підходів обчислення відстані, що визначає співвідношення (9), за географічними координатами вузлів та їх віртуальними координатами. Таким чином, обчислення відстані між вузлами є логістичним параметром функції ціни при синтезі і виборі стратегії управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ.

4. Результати дослідження

У результаті проведених досліджень було запропоновано та обґрунтовано формальну модель функціонування ІСУ маршрутизацією ПД в гарантоздатних сервіс-орієнтованих СМ ВТ в умовах конфлікту взаємодії вузлів, обмежень та невизначеностей.

Виходячи із запропонованої моделі взаємодії вузлів в децентралізованій розподіленій СМ ВТ, сформульовано задачу синтезу і вибору стратегій управління маршрутизацією ПД як задачу динамічної дискретної оптимізації.

Відповідно до запропонованої формальної моделі розроблено метод формального опису топології СМ ВТ у фізичному і віртуальному просторі у вигляді математичної моделі і нотації (мови) опису процесів функціонування мережі. Це дозволило за рахунок застосування теоретико-множинної моделі процесів взаємодії елементів СМ визначити оптимальні маршрути ПД згідно з критерієм гарантоздатності за умов конфлікту, обмежень та невизначеностей.

При рішенні задачі синтезу і вибору стратегії управління маршрутизацією ПД в конфліктуючій СМ ВТ враховані основні параметри, що характеризують поточний стан продуктивності мережі, можливості оптимального управління її пропускною спроможністю за умов забезпечення гарантоздатності.

Узагальнені результати дослідження часових показників рішення задачі управління маршрутизацією в розподіленій СІУ ПД в СМ ВТ наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз часових показників рішення задачі синтезу і вибору маршруту передачі даних в сенсорній мережі варіативної топології

		Кількість обчислювальних процесів (пакетів даних)	Час обчислення, мсек					
			Послідовне обчислення					
Метод управління маршрутизацією за умов забезпечення гарантоздатності	Евристичний алгоритм	5000	0,9	3,0	31,0	47,0	49,0	62,0
		25000	16,0	62,0	94,0	141,0	188,0	234,0
		100000	63,0	189,0	361,0	704,0	1406,0	2187,0
		250000	125,0	453,0	891,0	1313,0	1750,0	2813,0
		750000	329,0	672,0	1314,0	1985,0	2625,0	3213,0
	1500000	656,0	1328,0	2609,0	3953,0	5250,0	6547,0	
	Мурашиний алгоритм	5000	2,0	9,0	620,0	2470,0	8624,0	16978,0
		25000	19,0	82,0	1880,0	7400,0	33088,0	64116,0
		100000	69,0	262	7220,0	36960,0	247456,0	599238,0
		250000	137,0	628,0	17820,0	69893,0	308021,0	707764,0
750000		362,0	932	26280,0	104212,0	462103,0	880362,0	
1500000	721,0	1842	5218,0	207533,0	924231,0	1793878,0		
			5	10	20	30	40	50
			Кількість вузлів сенсорної мережі					

Продовження табл. 1

		Кількість обчислювальних процесів (пакетів даних)	Час обчислення, мсек					
			Паралельне обчислення					
Метод управління маршрутизацією за умов забезпечення гарантоздатності	Евристичний алгоритм	5000	0,6	11,0	17,0	32,0	41,0	47,0
		25000	15,0	28,0	79,0	125,0	172,0	203,0
		100000	31,0	169,0	343,0	687,0	1359,0	2156,0
		250000	94,0	422,0	859,0	1265,0	1703,0	2734,0
		750000	312,0	641,0	1281,0	1938,0	2562,0	3203,0
	1500000	625,0	1296,0	2508,0	3907,0	5109,0	6406,0	
	Мурашиний алгоритм	5000	1,3	33,0	340,0	1680,0	7216,0	12878,0
		25000	35,9	84,0	1580,0	6526,6	30272,0	55622,0
		100000	68,2	507,0	6860,0	36067,8	237952,0	590744,0
		250000	206,8	1266,0	17180,0	66412,7	299728,0	749116,0
750000		684,4	1923,0	25620,0	102745,1	450912,0	877622,0	
1500000	1375,0	3888,0	50160,0	205117,3	899184,0	1755244,0		
			5	10	20	30	40	50
			Кількість вузлів сенсорної мережі					

Забезпечення гарантоздатності при взаємодії вузлів СМ ВТ здійснюється із застосуванням двох концептуальних підходів обчислення віртуальної відстані між вузлами мережі за географічними і віртуальними координатами. Таким чином, обчислення відстані між вузлами є логістичним параметром функції ціни при синтезі і виборі стратегії управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ.

Висновки

Відповідно до мети і задачі дослідження було отримано такі результати:

1. Розроблено метод формального опису топології СМ ВТ у вигляді граф-моделі, яка визначає елементи моделі, а також правила і відношення при інформаційній взаємодії елементів моделі у процесі ПД. Визначені елементи моделі (вузли і ребра граф-моделі) утворюють мовні конструкції при взаємодії в процесі ПД. Таким чином синтезується внутрішня мова і нотації опису процесів взаємодії вузлів СМ при ПД.

2. Виходячи з граф-моделі опису топології, мови і нотації опису процесів взаємодії вузлів СМ ВТ при ПД, розроблено ТММ, яка дозволяє сформулювати віртуальний простір функціонування мережі. ТММ в загальному випадку дозволяє визначити семіотичну і семантичну моделі функціонування СМ, а процес управління розглядати як процес синтезу і вибору маршруту ПД. Невизначеності і обмеження, що пов'язані з функціонуванням СМ, та вплив зовнішніх і внутрішніх збурень враховуються в ТММ і в критерії оптимізації при синтезі і виборі маршруту ПД.

3. Для вирішення задачі управління маршрутизацією ПД як задачі динамічної дискретної оптимізації запропоновано адитивний критерій оптимізації. Критерій враховує істотні складові, які забезпечують вимоги гарантоздатності при функціонуванні розподіленої СІУ маршрутизацією гетерогенної СМ ВТ як семантичної мережі.

4. В якості моделі опису процесу синтезу і вибору оптимальних рішень для розподіленої СІУ маршрутизацією ПД запропоновано модель рішення конфлікту. Для рішення задачі конфлікту запропоновано використовувати евристичний метод синтезу і вибору оптимального рішення – метод інтегрального усікання варіантів (МІУВ) [16]. Застосування МІУВ і ТММ дозволяє отримати поліноміальний час синтезу і вибору маршруту ПД і запропонувати новітній алгоритм функціонування розподіленої СІУ маршрутизації ПД в СМ ВТ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольдштейн Б.С. и Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 160 с.
2. Семко О.В. «Логіко-семантична модель управління маршрутизацією потоків даних в сенсорних мережах». Системи управління, навігації та зв'язку, вип. 6(52), pp.135-139, 2018.
3. Бертсекас Д. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. 544 с.
4. Беркман Л.Н., Стеклов В.К. Проектирование телекоммуникационных сетей. К.: Техніка, 2002. 792 с.
5. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем. К.: НАОУ, 2004. 226 с.

6. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
7. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988. 280 с.
8. Понtryагин Л.С. Основы комбинаторной топологии. М.: Наука, 1986. 120 с.
9. Кучерявый А.Е. и Цуприков А.Л. Сети связи следующего поколения. М. : ФГУП ЦНИИС, 2006. 278 с.
10. Рихтер К. Динамические задачи дискретной оптимизации. М.: Радио и связь, 1985. 136 с.
11. Бершадский А.М., Курилов Л.С. и Финогеев А.Г. «Обзор методов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях». Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2012. № 1(21), pp. 47–57.
12. Пападимитру Х. и Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М.: Мир, 1985. 510 с.
13. Павлов В.В. Конфликты в технических системах. К: Вища школа, 1982. 184 с.
14. Михалевич В.С., Трубин В.А. и Шор Н.З. Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования: модели, методы, алгоритмы. М.: Наука, 1986. 264 с.
15. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. К: Наукова думка, 2006. 264 с.
16. Семко О.В. і Семко В.В. «Дослідження властивостей рішення задачі конфлікту за методом інтегрального усікання варіантів». Проблеми інформатизації та управління, вип. 2(46), pp. 60-71, 2014.
17. Карпов В.Э. Классическая теория компиляторов. М.: МГИЭМ, 2011. 91 с.
18. Коньков В.Г. и Пупков К.А. Интеллектуальные системы. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 348 с.

REFERENCES

1. Goldshtejn B. S. i Kucheryavyj A. E. (2014). Seti svyazi post-NGN. [Communication networks post-NGN]. SPb.: BHV-Peterburg (in Russian).
2. Semko O. V. (2018). «Logiko-semantychna model upravlinnya marshrutyzaciyeyu potokiv danyx v sensoryx merezhax». [The logico-semantic model of the control of the routing of the flows in sensor networks]. Systemy upravlinnya, navigaciyi ta zvyazku, vol. 6, no. 52, pp.135-139.
3. Bertsekas D. (1989). Seti peredachi dannyh. [Data networks]. М.: Mir. (in Russian).
4. Berkman L. N., Steklov V. K. (2002). Proektuvannya telekomunikacijnyx mrezh. [Design of telecommunication networks]. К.: Tekhnika. (in Ukrainian).
5. Barabash O. V. (2004). Postroenie funkcionalno ustojchivyh raspredelennyh informacionnyh system. [Construction of functionally stable distributed information systems]. К.: NAOU. (in Russian).
6. Pospelov D. A. (1986). Sytuacyonnoe upravlenye: teoryya i praktyka. [Situational management: theory and practice]. М.: Nauka. (in Russian).
7. Pospelov G. S. (1988). Iskusstvennyj intellekt – osnova novoj informacionnoj tekhnologii. [Artificial intelligence - the basis of new information technology]. М.: Nauka. (in Russian).
8. Pontryagin L. S. (1986). Osnovy kombinatornoj topologii. [Basics of combinatorial topology]. М.: Nauka. (in Russian).
9. Kucheryavyj, A. E. i Cuprikov A. L. (2006). Seti svyazi sleduyushchego pokoleniya. [Next generation communication networks]. М. : FGUP CNIIS. (in Russian).
10. Rihter K. (1985). Dinamicheskie zadachi diskretnoj optimizacii. [Dynamic discrete optimization problems]. М.: Radio i svyaz. (in Russian).

11. Bershadskij A. M., Kurilov L. S. i Finogeev A. G. (2012). «Obzor metodov marshrutizacii v besprovodnyh sensoryh setyah». [Overview of routing methods in wireless sensor networks]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki, vol. 1, no. 21, pp. 47–57.
12. Papadimitru H. i Stajglic K. (1985). Kombinatornaya optimizaciya. Algoritmy i slozhnost. [Combinatorial optimization. Algorithms and complexity]. M.: Mir. (in Russian).
13. Pavlov V.V. (1982). Konflikty v tekhnicheskikh sistemah. [Conflicts in technical systems]. K: Vishcha shkola. (in Russian).
14. Mihalevich V. S., Trubin V. A. i Shor N. Z. (1986). Optimizacionnye zadachi proizvodstvenno- transportnogo planirovaniya: modeli, metody, algoritmy. [Optimization problems of production and transport planning: models, methods, algorithms]. M.: Nauka. (in Russian).
15. Kuncovich V. M. (2006). Upravlenie v usloviyah neopredelennosti: garantirovannye rezultaty v zadachah upravleniya i identifikacii. [Management under uncertainty: guaranteed results in management and identification tasks]. K: Naukova dumka. (in Russian).
16. Semko O. V. i Semko V. V. (2014). «Doslidzhennya vlastyvostej rishennya zadachi konfliktu za metodom integralnogo usikannya variantiv». [Investigation of the properties of the solution of the conflict problem by the method of integral truncation of variants]. Problemy informatyzaciyi ta upravlinnya, vol. 2. no. 46, pp. 60-71.
17. Karpov V. E. (2011). Klassicheskaya teoriya kompilyatorov. [Classical theory of compilers]. M.: MGIEHM. (in Russian).
18. Konkov V. G. i Pupkov K. A. (2003). Intellektualnye sistemy. [Intellectual systems]. M.: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana. (in Russian).

Стаття надійшла до редакції 09.01.2019.