

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

---

УДК 681.3

**С. В. Юхимчук**, д-р техн. наук, проф.;  
**Д. А. Білоус**, асп.

## ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ З ТЕХНОЛОГІЄЮ MPLS ЗА КРИТЕРІЯМИ ВАРТОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ

*Розроблено генетичний алгоритм синтезу топологічної структури комп'ютерних мереж з технологією MPLS з урахуванням показників живучості, що дозволяє підвищити ефективність процесу проектування мережі з одночасним скороченням витрат та часових ресурсів. Наведені результати експериментальних досліджень функціонування алгоритму.*

### Вступ

Відповідно до стандарту «Multiprotocol Label Switching Architecture» [1] від 2001 року, MPLS (MultiProtocol Label Switching) є високошвидкісною технологією комутації пакетів у багатопрокольних мережах, що базується на використанні міток. Сьогодні технологія MPLS застосовується для розробки високошвидкісних магістралей передачі даних з трафіком будь-якого мережевого протоколу, що підтримує маршрутизацію.

Традиційними вимогами до технологій магістральних мереж є вимоги щодо забезпечення високого рівня пропускних спроможностей, високої надійності та живучості, малих значень часу доставки повідомлень та частки втрачених пакетів, здатності до масштабування [2]. Останнім часом до зазначених традиційних вимог частіше додаються вимоги щодо можливості організації доступу до інтегрованих сервісів мережі, організації віртуальних приватних мереж тощо. Саме для розв'язання подібних задач і розробляється технологія MPLS, яка забезпечує широкі можливості щодо побудови магістральних мереж з практично необмеженими властивостями масштабування та високим рівнем якості обслуговування QoS (Quality of Service).

За умов комп'ютеризації та інформатизації переважної більшості сфер людської діяльності та зростаючих вимог щодо якості, надійності та вартості обслуговування, актуальною є задача синтезу топологічної структури мережі з технологією MPLS при обмеженнях, що покладені на сумарну вартість мережі, якість обслуговування та надійність синтезованої структури. Існуючі алгоритми синтезу оптимальної структури мережі (наприклад алгоритм Прима, алгоритм Єжі-Вільямса, алгоритм Краскала [3]) базуються на евристичних принципах і не враховують специфіку функціонування мереж з технологією MPLS, тому не можуть у своєму класичному вигляді бути використані для проектування реальних комп'ютерних мереж. Генетичний алгоритм синтезу структури глобальних мереж, що був розроблений Зайченко Ю. П. у [4], дозволяє ефективно вирішувати задачу структурного синтезу мереж з технологією MPLS, проте не враховує показників живучості, використовує випадковий алгоритм для генерації множини початкових структур, і, крім того, складність запропонованого алгоритму становить  $O(m^2 n^2 (n^2 + m^2))$ , де  $n$  — кількість вузлів мережі,  $m$  — кількість ліній зв'язку, не є прийнятною для використання в реальних умовах в процесі синтезу структури глобальної мережі з великою кількістю вузлів. Комбінаторний алгоритм топологічної оптимізації мережі передачі даних, що був запропонований В. М. Вишневським у [2], хоча і позбавлений зазначених вище недоліків і дозволяє враховувати специфічні характеристики мереж з технологією MPLS (наприклад існування декількох класів повідомлень), проте враховує

лише структурні обмеження на надійність функціонування мережі з синтезованою структурою. Тому актуальною задачею є розробка алгоритму структурного синтезу мережі з технологією MPLS не лише за критеріями вартості та ефективності, але й за критеріями живучості, що може дозволити підвищити швидкодію та точність результатів процесів синтезу та оптимізації структури подібних мереж за рахунок підвищення ефективності та швидкодії алгоритмів генерації топологічних структур мереж.

### Постановка задачі

Зазвичай проектування глобальних комп'ютерних мереж відбувається поетапно з поступовим збільшенням розмірності мережі, кількості вузлів та ліній зв'язку [2]. Тому на перших етапах за невеликої кількості вузлів вважається доцільним отримувати точне рішення задачі синтезу оптимальної топологічної структури мережі. Враховуючи, що відомі евристичні наближені алгоритми синтезу мережі [2] не дозволяють знаходити точне рішення навіть на перших етапах, існує необхідність в розробці алгоритму синтезу топологічної структури мережі, що буде оптимальною за критеріями вартості, ефективності та живучості.

Задача оптимального вибору топологічної структури є однією з основних підзадач задачі проектування та оптимізації комп'ютерних мереж з технологією MPLS і в загальному вигляді може бути сформульована таким чином:

Задано:

– множину вузлів мережі  $V = \{V_i\}, i = \overline{1, n}$  (де  $n$  — кількість вузлів мережі) та координати їх розміщення;

– множину пропускних спроможностей каналів зв'язку  $D = \{D_j\}, j = \overline{1, M}$ , де  $M$  — кількість доступних типів каналів зв'язку;

– множину питомих вартостей каналів зв'язку  $C = \{C_j\}, j = \overline{1, M}$ ;

– множину характеристик класів обслуговування (пріоритетність, допустимі затримки, допустимі частки втрачених пакетів)  $Q = \{q_l\}, l = \overline{1, K}$ , де  $K$  — визначена кількість класів обслуговування;

– матрицю інтенсивностей вимог трафіку кожного із класів для кожної пари вершин  $H = \|h_{ij}^k\|$ .

Потрібно знайти топологію мережі у вигляді неорієнтованого графу  $G = (V, E)$ , де  $E = \{E_{ij}\}$  — множина каналів зв'язку між вузлами  $i$  та  $j$ , що характеризуються довжиною  $l$  та обраним типом каналу  $m$ , таким чином, щоб забезпечити

$$C(G) = \min(C(G')), \quad (1)$$

де  $C(G)$  — функція вартості графу, яка знаходиться як сума вартостей обраних ребер,  $G'$  — будь-який остовий підграф графу  $G$ , за обмежень:

–  $\forall q: T_{ij}^q \leq T^q$ , затримка в передачі пакетів, де  $T^q$  — максимально допустима затримка для кожного класу обслуговування ( $q = 1 \dots K$ );

– значення максимального потоку повідомлень для кожного класу обслуговування, що може циркулювати між вершинами  $i$  та  $j$  задовольняє значенню з матриці вимог  $\forall q: f_{ij}^q \geq h_{ij}^q$ ;

– сумарна величина потоку  $f_{ij}$  не перевищує пропускну спроможність каналу зв'язку  $E_{ij}$ ;

– частка втрачених пакетів  $\forall q: Y_{ij}^q \leq Y^q$ , де  $Y^q$  — максимально допустима частка втрачених пакетів між вузлами  $i$  та  $j$  для кожного класу обслуговування ( $q = 1 \dots K$ );

– показники живучості мережі:  $\forall m: Z_m \geq Z_m'$ , де  $Z_m$  — фактичне значення  $m$ -го показника живучості,  $Z_m'$  — мінімально допустиме значення  $m$ -го показника живучості;

– вартість мережі не перевищує задану  $C(G) \leq C_{\max}$ .

### Розв'язання задачі

В роботах [2, 5] розглянуті показники живучості, обчислення яких доцільно при визначенні рівня живучості та надійності функціонування мережі. При розв'язанні поставленої задачі пропонується використовувати таку множину основних показників живучості [5]:

–  $\alpha(G(V, E))$  – довільна вузлова зв'язність мережі  $G(V, E)$  — найменша кількість вузлів графу  $G(V, E)$ , видалення яких призводить до незв'язного графу.

–  $\beta(G(V, E))$  — довільна лінійна зв'язність мережі  $G(V, E)$  — найменша кількість ребер графу  $G(V, E)$ , видалення яких призводить до незв'язного графу.

–  $\delta(G(V, E))$  — діаметр мережі — діаметр графу  $G(V, E)$ , що визначається як довжина максимального шляху між кожною парою вершин графу  $G(V, E)$ .

–  $\varepsilon(G(V, E))$  — мінімальна кількість шляхів між вузлами мережі  $G(V, E)$  — найменша кількість шляхів між кожною парою вершин, які не містять однакових ліній зв'язку [2].

Генетичний алгоритм складається з таких етапів:

*Попередній етап.* Синтезування початкової множини структур-претендентів:  $G_x(V, E)$ ,  $x = \overline{1, X}$ , де  $X$  — потужність початкової множини. Визначення початкової множини претендентів доцільно проводити шляхом генерації остових дерев на вершинах шуканого графу  $V$  з урахуванням обмежень на показники живучості. Враховуючи, що  $\varepsilon(G(V, E))$  опосередковано впливає на  $\alpha(G(V, E))$  та  $\beta(G(V, E))$ , на попередньому етапі алгоритму достатньо розглянути значення критеріїв  $\delta(G(V, E))$  — діаметра графу та  $\varepsilon(G(V, E))$  — мінімальної кількості шляхів між вершинами графу. Для врахування обмежень на мінімальну кількість шляхів визначимо необхідну (але не достатню) умову

$$\deg(\forall v \in V(G(V, E))) \geq Z_\varepsilon, \quad (2)$$

де  $\deg(v)$  — ступінь вершини графу  $v$ ,  $Z_\varepsilon$  — вимога за критерієм мінімальної кількості шляхів:  $\varepsilon(G(V, E)) \geq Z_\varepsilon$ .

Для генерації множини структур-претендентів пропонується використати ітераційний алгоритм пошуку, на кожній ітерації якого «жадібним» алгоритмом Прима генерується множина претендентів з фіксованою кількістю ребер  $M$ . На першій ітерації  $M = N$ , на кожній наступній (якщо не знайдено оптимального рішення)  $M$  збільшується на 1. Якщо на поточному  $i$ -му кроці роботи алгоритму знайдено оптимальний розв'язок (для  $m$  ребер) є гіршим за рішення, що було отримане на попередньому ( $i - 1$ )-му кроці, алгоритм завершується. В якості структур-претендентів обирається не лише отримана оптимальна структура з вартістю  $C_{opt}$ , але й структури, вартість яких не перевищує  $C_{opt}(1 + E)$ , де  $E$  — визначена величина можливого відхилення (5—10 %). Складність алгоритму Прима лінійна, проте в алгоритмі використовується порядкове сортування елементів матриці вартості ребер графу (обчислювальна складність «швидкого» сортування складає  $O(n \log n)$  [6]). В такому випадку складність алгоритму генерації початкових структур складе  $O(n)O(n \log n) = O(n^2 \log n)$ . В результаті роботи алгоритму обираються  $N'$  початкових структур, а також визначаються нижні границі вартості мережі та кількості каналів зв'язку.

*Ітераційний етап.* Етап, що складається з однотипних ітерацій визначення показників ефективності кожної із структур-претендентів та оптимізації найбільш вдалих структур за показниками вартості, продуктивності та живучості. Ітераційний етап завершується за умови виконання (1) з урахування зазначених обмежень або ж коли вичерпана множина претендентів.

Для кожної ( $i + 1$ )-ї ітерації входним параметром є множина з  $N$  структур-претендентів, отриманих в результаті  $i$ -ї ітерації  $\Gamma = \{G_1^i, \dots, G_N^i\}$ . Нехай  $C_\Sigma(G_j^i)$  — значення сумарної вартості  $j$ -ї структури в популяції. Розглянемо кожен із кроків етапу.

1. Вибір структури для модифікації. Доцільно обирати для модифікації структуру із найменшим значенням вартості. Але використання генетичного алгоритму передбачає використання деякої випадкової функції для вибору організму з популяції, тому вибір графової структури слід

проводити з ймовірністю, обернено пропорційною вартості [4]. Наприклад з ймовірністю

$$p_j^i = \frac{(C_\Sigma(G_j^i))^{-1}}{\sum_{n=1}^N (C_\Sigma(G_n^i))^{-1}}.$$

2. Для обраної графової структури-претендента визначається множина ребер, видалення яких не приведе до зменшення значень показників живучості  $E_{del}^i$ . Пошук доцільних кандидатів на видалення проводиться шляхом аналізу графової структури претендента на наявність «мостів» [2, 5] та вилучення отриманої множини ребер з множини кандидатів на вилучення.

3. Для обраної графової структури-претендента визначається множина ребер-кандидатів на включення  $E_{ins}^i$ .

4. Якщо множина  $E_{del}^i$  пуста  $E_{del}^i = \emptyset$ , фіксуємо і видаляємо поточну структуру  $G_j^i$  з множини  $\Gamma = \{G_1^i, \dots, G_N^i\}$  і додаємо її у підсумковий список претендентів  $\Pi = \{G_1, \dots, G_L\}$ . В протилежному випадку для множини  $E_{del}^i$  обчислюються показники неефективності кожного з ребер [4]. З ймовірністю, пропорційною показнику неефективності вилучається ребро  $(v_1^-, v_2^-)$ , перетворюючи поточну структуру  $G_j^i$  у  $G_j^i \setminus (v_1^-, v_2^-)$ .

5. Для отриманої структури  $G_j^i \setminus (v_1^-, v_2^-)$  вирішується задача вибору пропускних спроможностей каналів зв'язку та розподілення потоків. Обчислюється вартість структури.

6. Вартість мережі зменшено зі збереженням показників живучості, що гарантується кроком 2. Тому, за умови виконання обмежень, встановлених на значення часу доставки повідомлень та частки втрачених пакетів, структура  $G_j^i \setminus (v_1^-, v_2^-)$  замінює структуру  $G_j^i$  у поточній популяції. Ітерація закінчується.

7. Відбувається аналіз ефективності введення ребер із множини  $E_{ins}^i$  за запропонованим у [4] алгоритмом.

8. Якщо множина  $E_{ins}^i$  пуста  $E_{ins}^i = \emptyset$ , видаляємо ребро  $(v_1^-, v_2^-)$  з множини  $E_{del}^i$  і повертаємося на крок 4. В протилежному випадку з ймовірністю прямо пропорційною визначеним значенням обирається ребро  $(v_1^+, v_2^+)$ , поточна структура перетворюється з  $G_j^i \setminus (v_1^-, v_2^-)$  у  $G_j^i \cup (v_1^+, v_2^+) \setminus (v_1^-, v_2^-)$ .

9. Для отриманої структури  $G_j^i \cup (v_1^+, v_2^+) \setminus (v_1^-, v_2^-)$  вирішується задача вибору пропускних спроможностей каналів зв'язку та розподілення потоків. Обчислюється вартість структури.

10. Показники живучості із введенням ребра не погіршуються, тому, якщо вартість структури  $G_j^i \cup (v_1^+, v_2^+) \setminus (v_1^-, v_2^-)$  менша за вартість  $G_j^i$ , замінюємо структуру  $G_j^i$  на структуру  $G_j^i \cup (v_1^+, v_2^+) \setminus (v_1^-, v_2^-)$  у поточній популяції, ітерація завершується.

11. У протилежному випадку видаляємо ребро  $(v_1^+, v_2^+)$  з множини  $E_{ins}^i$  і повертаємося на крок 8.

Кроки 1—11 повторюються для всіх ребер з множин  $E_{del}^i$  та  $E_{ins}^i$  для поточної структури, а також для всіх структур з множини  $\Gamma = \{G_1^i, \dots, G_N^i\}$ .

Після завершення аналізується вартість кожної зі структур множини  $\Pi = \{G_1, \dots, G_L\}$ , і відбувається вибір найбільш «вдалої» за умови  $C_\Sigma(G_i) = \min$ .

Визначимо обчислювальну складність ітераційного етапу. На початку кожної з ітерацій вхідними даними є  $n$  – кількість вузлів мережі,  $m$  – кількість каналів зв'язку та  $N$  – потужність множини структур претендентів. Задача вибору структури для модифікації вирішується за лінійний час відносно функцій вартості структури. Потужність множини кандидатів на виключення  $E_{del}^i$  скла-

дає  $m$ , кандидатів на включення  $E_{ins}^i = \frac{n(n-1)}{2}$ . В такому випадку верхня межа складності оптимізації однієї структури складе  $m \frac{n(n-1)}{2} \approx O(mn^2)$ . Верхня межа для алгоритму вибору пропускних спроможностей та розподілення потоків визначена в [4] та складає  $O(n^2 + m^3)$ . Тоді обчислювальна складність однієї ітерації алгоритму буде  $O(mn^2(n^2 + m^3))$ .

З урахуванням потужності мережі  $N$ , кількості класів обслуговування  $K$ , остаточно обчислювальна складність алгоритму синтезу складає

$$O(mn^2) + O(Cmn^2(n^2 + m^3)) = O(mn^2(1 + C(n^2 + m^3))),$$

де  $C = NK$ .

Збіжність розробленого алгоритму доводиться із таких міркувань: на кожній ітерації алгоритму аналізується, досліджується та оптимізується певна множина структур, які є найбільш вдалим за обраними критеріями (наприклад, критерієм вартості). Використання класичних принципів канонічних генетичних алгоритмів – панміксії та інбридингу – забезпечує збіжність алгоритму через використання для подальшого аналізу оптимальної підмножини структур. В найгіршому випадку (за умов неоптимального вибору структур) кількість ітерацій генетичного алгоритму буде прямувати до повного перебору, який є апіорно збіжним.

З точки зору програмної реалізації доцільним вбачається використання розподіленої та відкритої модульної структури, що дозволить гнучкіше та в «режимі реального часу» змінювати алгоритми блоків, які використовуються на кожному із етапів алгоритму. Перше наближення подібної модульної структури наведено на рисунку.

З метою дослідження ефективності розробленого генетичного алгоритму доцільно перевірити результати роботи і результати повного перебору варіантів, що є можливим на мережах з малою кількістю вузлів. Проведено експериментальні дослідження на гіпотетичному прикладі розподіленої малої мережі з такими характеристиками:

- мережа складається із 7 вузлів;
- існують два класи обслуговування (з допустимими затримками у 0,001 с та 0,005 с, відповідно);
- існують два типи каналів зв'язку (10МБіт/с вартістю 2000 грн за 1 км та 1 Гбіт/с вартістю 10000 грн за 1 км).

– обмеження на кількість шляхів  $\varepsilon(G(V, E)) \geq 2$ .

Для кожного дослідження варіювалися вхідні вимоги трафіка за кожним класом обслуговування і проводилися дослідження методами розробленого генетичного алгоритму (ГА) та повного перебору варіантів (ПП). Для повного перебору кількість структур, що аналізувалися, склала

$$2^{\frac{n(n-1)}{2}} = 2^{21} = 2097152.$$

Результати дослідження наведено у таблиці.



Модульна структура генетичного алгоритму синтезу топологічної структури комп'ютерної мережі

## Дослідження ефективності роботи генетичного алгоритму

Номер досліджу	Вартість оптимальної структури (ГА), тис. грн	Вартість оптимальної структури (ПП), тис. грн	Кількість структур, що аналізувалися	Похибка
1	420,2	392,8	~40000	0,07
2	352,8	337,0	~180000	0,05
3	468,1	447,3	~80000	0,05
4	199,4	172,8	~60000	0,15
5	550,2	511,7	~100000	0,08

Як видно з наведених результатів, середнє відхилення від отриманого повним перебором результату склало менше 10 % при суттєвому зменшенні затрат часу на аналіз варіантів структур. В подальшому доцільним вважається дослідження залежності ефективності результатів та обсягів дослідження від обраного в алгоритмі значення точності. Рациональне збільшення потужності множини структур, що аналізуються, дозволить ефективніше обирати оптимальну структуру зі збереженням високої швидкодії алгоритму синтезу.

## Висновки

В роботі запропоновано генетичний алгоритм синтезу топологічної структури комп'ютерних мереж з технологією MPLS з урахування обмежень на живучість. Визначено обчислювальну складність та обґрунтовано збіжність запропонованого алгоритму. Наведено рекомендації щодо програмної реалізації алгоритму синтезу топологічної структури комп'ютерних мереж із використанням модульної архітектури.

Використання генетичного алгоритму для синтезу топологічних структур комп'ютерних мереж може дозволити підвищити ефективність процесів проектування мережі із технологією MPLS з одночасним скороченням витрат та часових ресурсів. Використання модульної архітектури дозволяє створити гнучкий та конкурентоспроможний програмний комплекс проектування, оптимізації та моделювання комп'ютерних мереж з технологією MPLS.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Network Working Group, Cisco Systems, Inc. — Internet Official Protocol Standards. Multiprotocol Label Switching Architecture. — Режим доступу: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3031.txt>.
2. Вишневикий В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В. М. Вишневикий. — М. : Техносфера, 2003. — 506 с.
3. Cahn R. Wide Area Network Design : Concepts and Tools for Optimization — Morgan Kaufmann, 1998. — 441 с.
4. Зайченко Е. Ю. Структурный синтез компьютерных сетей с технологией MPLS / Е. Ю. Зайченко, Ю. П. Зайченко, Ашраф Абдель-Карим Абу-Аин // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2006. — № 4. — С. 65—70.
5. Білоус Д. А. Комплексний критерій оцінювання ефективності функціонування обчислювальних мереж / Д. А. Білоус, С. В. Юхимчук // Современные информационные и электронные технологии : тр. восьмой международной научно-практической конференции. — Одеса, 2007. — С. 117.
5. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. — М. : МЦНМО, 2002. — 960 с.

Рекомендована кафедрою інтелектуальних систем

Надійшла до редакції 19.07.09  
Рекомендована до друку 7.09.09

**Юхимчук Сергій Васильович** — завідувач кафедри, **Білоус Дмитро Анатолійович** — аспірант.  
Кафедра інтелектуальних систем, Вінницький національний технічний університет