

DOI 10.20535/2411-1031.2023.11.2.293752

УДК 004.724

ВАЛЕРІЙ НАЗАРЕВИЧ,
АРТЕМ МИКИТЮК,
ОЛЬГА ШЕВЧУК,
ІГОР КУЛИК

МЕТОД БЕЗПЕЧНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗАДАНИХ КРИТЕРІЇВ

У зв'язку із впровадженням нових мережевих сервісів, зростанням обсягів даних, які необхідно передати, застосуванням мереж у різних сферах, які мають певні вимоги до комунікації, виникає необхідність у створенні нових підходів до забезпечення якості та безпеки таких комунікацій. Провідні виробники мережевого обладнання та організації зі стандартизації розробляють нові алгоритми маршрутизації і, як результат, впроваджують нові протоколи маршрутизації або удосконалюють існуючі. Проте всі ці алгоритми охоплюють принципи маршрутизації для мереж загального користування і не враховують вимоги до комунікацій в мережах спеціального призначення. Таким чином, постає задача у дослідженні напрямків оптимізації маршрутизації мережевого трафіку, визначенні критеріїв оптимізації та подальшої розробки методу безпечної маршрутизації мережевого трафіку в залежності від заданих критеріїв. В роботі запропоновано метод безпечної маршрутизації, який враховує визначені вимоги при пошуку оптимального маршруту. Кожен маршрутизатор при використанні динамічної маршрутизації розраховує найкоротші маршрути до всіх інших мереж на основі алгоритму пошуку найкоротшого шляху. В даній роботі визначається спосіб розрахунку метрик на основі заданих критеріїв та формально описується алгоритм пошуку найкоротшого шляху. Введено критерії якості комунікації, які надають змогу забезпечити вимоги до комунікації в мережах спеціального призначення. Показано варіанти розрахунку цих критеріїв та визначені способи збору даних для їх розрахунку. Запропоновано формулу розрахунку метрики, яка включає в себе можливість вибору T -значень та визначення їх числових параметрів, для пріоритизації відповідних критеріїв. Визначено значення критеріїв за замовчуванням та перевірено розрахунки метрик за замовчуванням для різних типів інтерфейсів. Після розрахунку метрик задача зводиться до пошуку найкоротших шляхів у зваженому графі за допомогою алгоритму, який базується на основі алгоритму Дейкстри. Запропонований алгоритм пошуку найкоротшого шляху (задача про найкоротший шлях) полягає у знаходженні основного (найкоротшого) та резервного шляхів від заданої початкової вершини до всіх інших вершин графа. Виконаний формальний опис запропонованого алгоритму.

Ключові слова: маршрутизація, метрика, телеметрія, TWAMP, алгоритм пошуку найкоротшого шляху.

Постановка проблеми. Впровадження новітніх мережевих сервісів, зростанням обсягів даних, які необхідно передати, застосування мереж в різних сферах, які мають певні вимоги до комунікації, створюють необхідність у створенні нових підходів до забезпечення якості таких комунікацій. Однією з основних функцій мережі є маршрутизація, результат роботи якої впливає на якість надання послуг. Тому невід'ємною складовою забезпечення якості та безпеки є застосування оптимального методу безпечної маршрутизації, який буде враховувати необхідні вимоги [1] при пошуку маршруту.

Провідні виробники мережевого обладнання та організації зі стандартизації проводять дослідження в цьому напрямку та розробляють нові алгоритми маршрутизації, результатом чого є впровадження нових протоколів маршрутизації або удосконалення існуючих. Проте всі ці розробки охоплюють алгоритми маршрутизації для мереж загального користування та не враховують вимоги до комунікацій в мережах спеціального призначення. Таким чином, постає задача в дослідженні способів оптимізації маршрутизації мережевого трафіку, визначенні критеріїв для вибору оптимального маршруту і, в результаті, розробці методу безпечної маршрутизації мережевого трафіку в залежності від заданих критеріїв [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні доволі багато уваги приділяється вирішенню питань по забезпеченню якості надання мережевих послуг та побудови мереж, що відповідають визначеним показникам якості. Одним з основних питань для мереж спеціального призначення є вирішення проблеми пошуку найкоротшого (оптимального) маршруту [3] - [4], виходячи з вимог, що визначаються для якісної комунікацій в цій мережі, а також забезпечення відмовостійкості [5], [6] таких мереж. В результаті численних досліджень запропоновано ряд алгоритмів та методів оцінювання якості комунікаційних мереж, оптимізації маршрутизації мережевого трафіку [7], проектування мереж для забезпечення визначених вимог [8], навчання маршрутів передачі даних [2]. Але всі ці дослідження проводились для конкретних спеціалізованих мереж, таких як VoIP, мереж стільникового зв'язку, бездротових самоорганізованих мереж (БСМ) тощо [9], [10]. Тому виникає потреба в розробці методу безпечної маршрутизації мережевого трафіку, який буде враховувати визначені вимоги, а також який можливо застосувати для мультисервісних мереж.

Метою статті є забезпечення виконання вимог до комунікацій за допомогою методу оптимізації маршрутизації мережевого трафіку в залежності від заданих критеріїв.

Виклад основного матеріалу дослідження. Маршрутизація – це процес визначення маршруту прямування інформації між мережами. Кожен маршрутизатор при використанні динамічної маршрутизації розраховує найкоротші маршрути до всіх інших мереж на основі метрик та алгоритму пошуку найкоротшого шляху [11], [12]. В даній роботі визначається метод розрахунку метрик на основі заданих критеріїв та формально описаний алгоритм пошуку найкоротшого шляху.

Визначення критеріїв. Сучасні сервіси, які надаються користувачу, вимагають від мережі дотримання певних вимог [6], [13], які будуть забезпечувати відповідний рівень якості комунікації [7]. Тому в роботі пропонується ввести певні критерії [14] якості комунікації, які надають змогу забезпечити вищезазначені вимоги. В рамках даної роботи, до таких критеріїв відносяться [15]:

- доступність;
- надійність;
- захищеність;
- оперативність;
- збалансованість.

При виборі критерію йому відповідає певне значення $T - T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$ відповідно. T_1, T_2, T_4, T_5 можуть приймати значення в діапазоні від 0 до 100. Це надає змогу впливати на розрахунок метрики для того, щоб надати більший пріоритет певним вимогам (критеріям) [14]. Параметр T_3 приймає значення 1 або 0. Якщо $T_3 = 1$, то канал вважається захищеним, якщо $T_3 = 0$, то відповідно незахищеним.

Якщо критерій не повинен враховуватись в розрахунку метрики, то T -значення цього критерію буде дорівнювати 0, якщо враховується, то 1 (за замовчуванням) або більше (в випадку пріоритизації критерію).

Розрахунок критеріїв. У випадку, якщо критерій буде враховуватись в розрахунку метрики, окрім визначення T -значення необхідно розрахувати значення критерію. Для

визначення даних, які будуть використовуватись для розрахунку значень критеріїв використовуються цілий ряд мережевих протоколів моніторингу мережі [16] (такі як TWAMP, SNMP, телеметрія тощо).

Після збору необхідних вхідних даних, розрахунок критеріїв буде проводитись наступним чином:

1) доступність (A) – це властивість каналу зв'язку, яка полягає в тому, що користувач та/або процес може використовувати цей канал, не очікуючи довше заданого (прийнятного) інтервалу часу. Параметр доступності може приймати значення від 0 до 100, де 0 – канал недоступний повністю, а 100 – доступний. Цей параметр розраховується за формулою:

$$A = \frac{t_a}{t} \quad (1)$$

де t_a – час, протягом якого канал був доступний для використання за заданий проміжок часу, який визначає користувач;
 t – проміжок часу, визначений користувачем.

2) надійність (R) – це властивість каналу зв'язку зберігати протягом певного часу (визначеного користувачем) значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції. Цей параметр визначає рівень помилок каналу зв'язку протягом вказаного проміжку часу та може приймати значення в діапазоні від 0 до 100, де 0 – канал не надійний, а 100 – надійний. Даний параметр розраховується за формулою :

$$R = 100 - \frac{p_e}{p} \quad (2)$$

де p_e – сумарна кількість всіх помилок;
 p – кількість пакетів.

Оскільки помилки можливо визначити тільки для вхідного трафіку, то при розрахунку цього параметру помилки обраховуються на обох інтерфейсах каналу зв'язку та обирається максимальний.

3) захищеність (S) – це характеристика каналу зв'язку, яка гарантує захист від несанкціонованого доступу, випадкового або навмисного втручання. Як вже зазначалось, цей параметр приймає значення 1 або 0.

4) оперативність (D) – це характеристика, яка визначає загальний час, який потрібно пакету даних для переходу з одного вузла в інший. Цей параметр визначається за допомогою протоколів моніторингу мережі. Для визначення затримки за замовчування, використовується значення, виявлені експериментально провідними розробниками мережевого обладнання (див. табл. 1).

5) збалансованість (L) – це критерій, який визначає рівень завантаженості каналів зв'язку та ступінь балансування мережевого трафіку. Даний параметр розраховується за формулою:

$$L = \frac{B - l_a}{l_a} \quad (3)$$

де B – пропускна здатність каналу зв'язку;
 l_a – середня завантаженість каналу зв'язку.

Розрахунок метрики. Метрика маршрутизації – це числовий показник, обчислений алгоритмом маршрутизації для вибору або відхилення маршруту для передачі даних.

Для розрахунку метрики M використовується наступна формула:

$$M = N \cdot \left(\frac{10^8}{B}\right) \cdot \left(\frac{T_1}{A} + \frac{T_2}{R} + T_5 \cdot L + \frac{T_4 \cdot D}{10}\right) \quad (4)$$

де N – коефіцієнт середовища передачі даних.

Параметр N визначає середовище передачі інформації – волоконно-оптичні лінії, кабель на мідній основі, бездротове з'єднання. Цей параметр може приймати наступні значення:

- волоконно-оптичні лінії – 1;
- кабель на мідній основі – 2;
- бездротове з'єднання – 5.

Якщо $T_3 = 0$, то дане з'єднання не буде використовуватись для комунікацій, в яких обраний критерій “захищеність”.

За замовчуванням критерій T_4 дорівнює 1, а T_1, T_2, T_3, T_5 дорівнюють 0. Тоді, виходячи з вищезазначеної формули, при використанні єдиного середовища передачі даних (на прикладі волоконно-оптичних ліній), за замовчуванням формула для розрахунку метрики буде мати наступний вигляд:

$$M = \frac{10^8}{B} \cdot \frac{D}{10} \quad (5)$$

У табл. 1 наведено метрики за замовчуванням для різних типів інтерфейсів.

Таблиця 1 – метрики за замовчуванням

Тип інтерфейсу	Пропускна здатність (Kbps)	Затримка	Метрика
Ethernet	10000	1000 нс	1000000
FastEthernet	100000	100 нс	10000
GigabitEthernet	1000000	10 нс	100
10 GigabitEthernet	10000000	10 нс	10
100 GigabitEthernet	100000000	10 нс	1

Розрахунки, наведені в табл. 1 проводились з використанням значень затримки, які визначенні експертним шляхом провідними розробниками мережевого обладнання для різних типів інтерфейсів. В програмній реалізації, де буде впроваджено зазначений метод, значення затримки за замовчуванням буде використовуватись тільки на етапі інтеграції мережі, а на етапі експлуатації буде вимірюватись за допомогою протоколу TWAMP [17].

Визначення маршруту. Після розрахунку метрик задача зводиться до пошуку найкоротших основних та резервних шляхів [18] у зваженому графі, кожному ребру e якого приписано дійсне число $w(e)$, що є розрахованою метрикою, тобто вагою зазначеного ребра e .

Задача пошуку найкоротшого шляху (задача про найкоротший шлях) полягає у знаходженні найкоротшого шляху від заданої початкової вершини a до всіх інших вершин графа.

Найефективніший алгоритм визначення довжини найкоротшого шляху від фіксованої вершини до будь-якої іншої запропонував 1959 року датський математик Е. Дейкстра [12]. Цей алгоритм застосовний лише тоді, коли вага кожного ребра додатна.

В загальному зазначений алгоритм для окремої вершини полягає в наступному. Нехай $G = (V, E)$ – зважений неорієнтований граф, w_{ij} – вага дуги (v_i, v_j) . Почавши з вершини a , знаходимо вартість від вершини a до кожної із суміжних із нею вершин. Вибираємо вершину, вартість від якої до вершини a найменша, нехай це буде вершина v^* . Далі знаходимо вартість від вершини a до кожної вершини, суміжної з v^* вздовж шляху, який проходить через вершину v^* . Вибираємо меншу вартість з тої, що була та з поточно обчисленої. Знову вибираємо вершину, найближчу до a й не вибрану раніше; повторюємо процес [19] - [20].

В роботі пропонується використовувати алгоритм, який буде базуватися на описаному алгоритмі, але буде для кожної вершини визначати основний (найкоротший) та резервний

маршрути. Описаний процес зручно виконувати за допомогою присвоювання вершинам міток. Будемо використовувати мітки чотирьох типів – тимчасова основна, постійна основна, тимчасова резервна та постійна резервна. Вершини з постійними мітками групують у множину K , яку називають множиною позначених вершин (K_m та K_b – множини постійних основних та резервних міток відповідно). Решта вершин мають тимчасові мітки, і множину таких вершин позначимо як P (P_m та P_b – множини тимчасових основних та резервних міток відповідно), де $P = V \setminus K$. Позначатимемо мітку (тимчасову чи постійну) вершини v як $l(v)$. Значення постійної мітки $l(v)$ дорівнює довжині найкоротшого шляху від вершини a до вершини v , тимчасової – довжині найкоротшого шляху, який проходить лише через вершини з постійними мітками.

Фіксованою початковою вершиною вважаємо a , довжину найкоротшого шляху шукаємо до всіх вершин графа.

Опис алгоритму.

Пошук основних шляхів.

Крок 1. Присвоювання початкових значень. Виконати $l(a) = 0$ та вважати цю мітку постійною. Виконати $l(v_m) := \infty$ для всіх $v_m \neq a$ та вважати ці мітки тимчасовими. Виконати $x := a$, $K_m = \{a\}$.

Крок 2. Оновлення міток. Для кожної вершини $v \in \Gamma(x) \setminus K_m$ (суміжної з x вершини без постійної мітки) замінити мітки: $l(v_m) := \min\{l(v_m), l(v_m) + w(x, v)\}$, тобто оновити тимчасові мітки вершин, суміжних з вершиною x .

Крок 3. Перетворення мітки в постійну. Серед усіх вершин із тимчасовими мітками знайти вершину з мінімальною міткою, тобто знайти вершину v_m^* , з умови $l(v_m^*) := \min\{l(v_m)\}$, $v \in P_m$, $P_m = V \setminus K_m$.

Крок 4. Вважати мітку вершини v_m^* постійною й виконати $K_m := K_m \cup \{v_m^*\}$, $x := v_m^*$.

Крок 5. Для пошуку шляху від a до всіх інших вершин: якщо всі вершини отримали постійні мітки (включені в множину K_m), то ці мітки дорівнюють довжинам найкоротших шляхів і алгоритм закінчує роботу; інакше, якщо деякі вершини мають тимчасові мітки, то перейти до кроку 2.

Пошук резервних шляхів.

Крок 1. Присвоювання початкових значень. Виконати $l(a) := 0$ та вважати цю мітку постійною. Виконати $l(v_b) := \infty$ для всіх $v_b \neq a$ та вважати ці мітки тимчасовими. Виконати $x := a$, $K_b = \{a\}$.

Крок 2. Оновлення міток. Для кожної вершини $v \in \Gamma(x) \setminus K_b$ (суміжної з x вершини без постійної мітки) замінити мітки: якщо $x = a$, то $l(v_b) = l(v_m)$, для всіх інших вершин – $l(v_b) := \min\{l(v_b), l(v_b) + w(x, v)\} \setminus l(v_m)$, тобто оновити тимчасові мітки вершин, суміжних з вершиною x , виключаючи значення найкоротшого шляху основного маршруту для цієї вершини.

Крок 3. Перетворення мітки в постійну. Серед усіх вершин із тимчасовими мітками знайти вершину з мінімальною міткою, тобто знайти вершину v_b^* , з умови $l(v_b^*) := \min\{l(v_b)\}$, $v \in P_b$, $P_b = V \setminus K_b$.

Крок 4. Вважати мітку вершини v_b^* постійною й виконати $K_b := K_b \cup \{v_b^*\}$, $x := v_b^*$.

Крок 5. Для пошуку шляху від a до всіх інших вершин: якщо всі вершини отримали постійні мітки (включені в множину K_b), то ці мітки дорівнюють довжинам найкоротших шляхів і алгоритм закінчує роботу; інакше, якщо деякі вершини мають тимчасові мітки, то перейти до кроку 2.

Якщо після закінчення пошуку резервних шляхів залишаться вершини для яких $l(v_b^*) = \infty$, то це означає що резервного шляху до заданої вершини не існує. Така ситуація можлива лише коли граф не має циклів, тобто в результаті неправильного проектування, де мережа не має надлишкових з'єднань (див. рис. 1). В цьому випадку маршрутизатор буде мати лише основний маршрут.

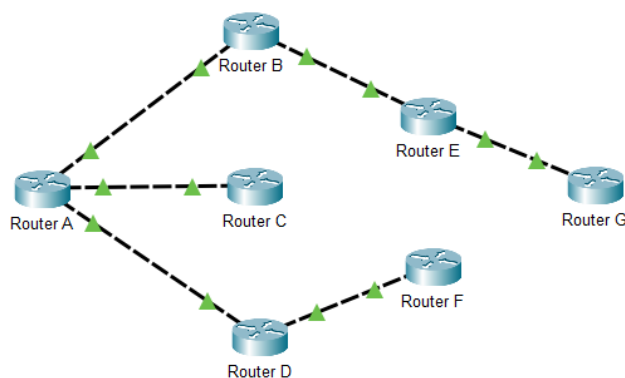


Рисунок 1 – Приклад мережі без надлишковості

У випадках коли відмовостійкість є однією в основних вимог при проектуванні мережі, то необхідно відповідно фізично організовуючи надлишкові з'єднання (див. рис. 2), які будуть надавати можливість забезпечувати цю вимогу та знаходити резервні маршрути [8].

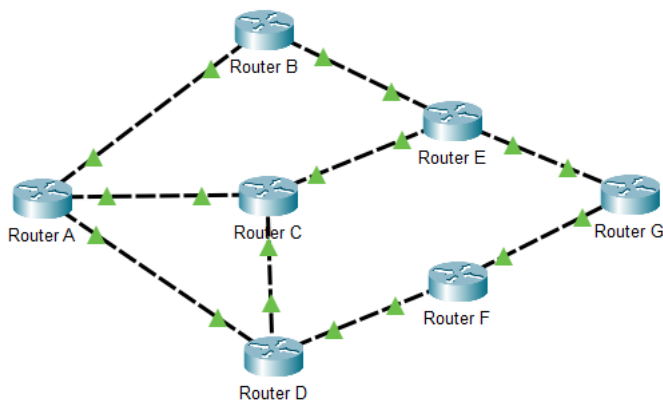


Рисунок 2 – Приклад відмостійкої мережі

Висновки. У статті запропоновано метод безпечної маршрутизації мережевого трафіку в залежності від заданих критеріїв. В роботі визначається спосіб розрахунку метрик на основі заданих критеріїв та формально описаний алгоритм пошуку найкоротшого шляху. Введено критерії якості комунікації, які надають змогу забезпечити вимоги до комунікації в мережах спеціального призначення. Показано варіанти розрахунку цих критеріїв та визначені способи збору даних для розрахунку заданих критеріїв [16] (TWAMP, SNMP, телеметрія та інші). Запропоновано формулу розрахунку метрики, яка включає в себе можливість вибору критеріїв (T -значень) та визначення їх значень, для пріоритизації відповідних критеріїв. Визначено значення критеріїв за замовчуванням та перевірено розрахунки метрик за замовчуванням для різних типів інтерфейсів.

Після розрахунку метрик задача зводиться до пошуку найкоротших шляхів у зваженому графі за допомогою алгоритму, який базується на алгоритмі Дейкстри. Запропонований

алгоритм пошуку найкоротшого шляху (задача про найкоротший шлях) полягає у знаходженні основного (найкоротшого) та резервного шляхів від заданої початкової вершини до всіх інших вершин графа. Виконаний формальний опис запропонованого алгоритму.

У перспективах подальших досліджень планується використати запропонований метод у програмній реалізації автоматизації налаштування мережі на базі технології SDN.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Є. В. Вавілов, “Фактори впливу на показники якості інформаційно-комунікаційних мереж”, на *Всеукр. наук. конф. асп. та мол. вч. Гармонізація суспільства – новітній напрямок розвитку держави*, Одеса, 2014, с. 7-10.
- [2] С. Д. Погорілий, та Р. В. Білоус, “Генетичний алгоритм розв’язання задачі маршрутизації в мережах”, *Проблеми програмування*, № 2-3, с. 171-177, 2010.
- [3] R. M. Desai, B. P. Patil, and D. P. Sharma, “Learning based route management in mobile ad hoc networks”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 7, no. 3, pp. 718-723, 2017, doi: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v7.i3>.
- [4] F. Safari, I. Savić, H. Kunze, J. Ernst, and D. Gillis, “A review of ai-based MANET routing protocols”, in *Proc. 2023 19th Int. Conf. Wireless Mobile Computing, Netw. Commun. (WiMob)*, Montreal, QC, Canada, June 21-23, 2023. IEEE, 2023. doi: <https://doi.org/10.1109/wimob58348.2023.10187830>.
- [5] О. В. Лемешко, *Потокові моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість: монографія*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2020.
- [6] K. Ergun, R. Ayoub, P. Mercati, and T. Rosing, “Reinforcement learning based reliability-aware routing in IoT networks”, *Ad Hoc Netw.*, vol. 132, art.102869, July 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102869>.
- [7] В. М. Безрук, та К. Р. Гальченко, “Багатокритеріальний підхід до оптимальної маршрутизації у мережах зв’язку”, у *Наукоємні технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах*, В. М. Безрук, Л. С. Глоба, та О. Є. Стрижак, Ред. Київ, Україна: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019, с. 83-96.
- [8] О. В. Лемешко, О. С. Єременко, М. О. Євдокименко, А. С. Шаповалова, Б. Слейман, *Моделювання та оптимізація процесів безпечної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах: монографія*, Харків, Україна: ХНУРЕ, 2022. doi: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-378-1>.
- [9] S. Salnyk, A. Storchak, and A. Mykytiuk, “Communication system information resource security breach model”, *Information technology and security*, vol. 7, no. 1. pp. 25-34, 2019. doi: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2019.7.1.184217>.
- [10] О. В. Соловйов, “Метод оптимізації функціонування VoIP мережі на основі вибору маршруту голосового виклику”, дис. канд. наук., Національний авіаційний університет, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/44450>. Дата звернення: Верес. 4, 2023.
- [11] H. Liao, and L. B. Kara, “Reinforcement learning for routing”, in *Machine Learning Applications in Electronic Design Automation*. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 277-306. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-13074-8_11.
- [12] V. Paxson, “End-to-end routing behavior in the internet”, *ACM SIGCOMM Comput. Communication Rev.*, vol. 36, no 5, pp. 41-56, Oct. 2006. doi: <https://doi.org/10.1145/1163593.1163602>.
- [13] M. Al. Jameel, T. Kanakis, S. Turner, A. Al-Sherbaz, and W. S. Bhaya, “A reinforcement learning-based routing for real-time multimedia traffic transmission over software-defined networking”, *Electronics*, vol. 11, no 15, art. 2441, Sept. 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11152441>.

- [14] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and P. P. Sahu, "Priority based routing and wavelength assignment with traffic grooming for optical networks", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 4, is. 6, pp. 480-489, May 2012. doi: <https://doi.org/10.1364/jocn.4.000480>.
- [15] K. T. Chen, C. C. Tu, and W. C. Xiao, "OneClick: A Framework for Measuring Network Quality of Experience", in *Proc. 2009 IEEE INFOCOM*, Rio De Janeiro, Brazil, April, 19-25, 2009. IEEE, 2009, pp. 702-710. doi: <https://doi.org/10.1109/infcom.2009.5061978>.
- [16] J. Liu et al., "EAGLE: Heterogeneous GNN-based Network Performance Analysis", in *Proc. 2023 IEEE/ACM 31st Int. Symp. Qual. Service (IWQoS)*, Orlando, FL, USA, June, 19-21, 2023. 10 p. IEEE, 2023. doi: <https://doi.org/10.1109/iwqos57198.2023.10188804>.
- [17] K. Hedayat, R. Krzanowski, A. Morton, K. Yum, and J. Babiarez, "RFC 5357: A Two-Way Active Measurement Protocol (TWAMP)", RFC Editor, Oct. 2008. doi: <https://doi.org/10.17487/rfc5357>.
- [18] K. Ramasamy, and D. Medhi, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*. Elsevier Science & Technology Books, 2017.
- [19] K. H. Rosen, *Discrete Mathematics and Its Applications*, NY, USA: McGraw-Hill Companies, 2012.
- [20] Ю. В. Нікольський, В. В. Пасічник, та Ю. М. Щербина, "Дискретна математика", Київ, Україна: Видавнича група BHV, 2007.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2023.

REFERENCES

- [1] E. V. Vavilov, "Factors influencing the quality indicators of information and communication networks", in *Proc. All-Ukr. science conf. of grad. stud. and young scient. Harmonization of society - the newest direction of state development*, Odesa, 2014, pp. 7-10.
- [2] S. D. Pohorily, and R. V. Bilous, "Genetic Algorithm for Solving Routing Problems in Networks", *Programming Problems*, no. 2-3 pp. 171-177, 2010.
- [3] R. M. Desai, B. P. Patil, and D. P. Sharma, "Learning based route management in mobile ad hoc networks", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 7, no. 3, pp. 718-723, 2017, doi: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v7.i3>.
- [4] F. Safari, I. Savić, H. Kunze, J. Ernst, and D. Gillis, "A review of ai-based MANET routing protocols", in *Proc. 2023 19th Int. Conf. Wireless Mobile Computing, Netw. Commun. (WiMob)*, Montreal, QC, Canada, June 21-23, 2023. IEEE, 2023. doi: <https://doi.org/10.1109/wimob58348.2023.10187830>.
- [5] O. V. Lemeshko, *Flow models and methods of routing in information communication networks: fault tolerance, security, scalability: monograph*. Kharkiv, Ukraine: KhNURE, 2020.
- [6] K. Ergun, R. Ayoub, P. Mercati, and T. Rosing, "Reinforcement learning based reliability-aware routing in IoT networks", *Ad Hoc Netw.*, vol. 132, art. 102869, July 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102869>.
- [7] V. M. Bezruk, and K. R. Galchenko, "A multi-criteria approach to optimal routing in communication networks", in *Science-intensive optimization and control technologies in information communication networks*, V. M. Bezruk, L. S. Globa, and O. E. Stryzha, Eds, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 83-96.
- [8] O. V. Lemeshko, et al., "Modeling and optimization of safe and fault-tolerant routing processes in telecommunication networks: monograph", Kharkiv, Ukraine: KhNURE, 2022. doi: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-378-1>.
- [9] S. Salnyk, A. Storchak, and A. Mykytiuk, "Communication system information resource security breach model", *Information technology and security*, vol. 7, no. 1. pp. 25-34, 2019. doi: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2019.7.1.184217>.

- [10] O. V. Solovyov, "A method for optimizing the operation of a VoIP network based on the selection of a voice call route", PhD thesis, National Aviation University, 2020. [Online]. Available: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/44450>. Accessed on: Sep. 4, 2023.
- [11] H. Liao, and L. B. Kara, "Reinforcement learning for routing", in *Machine Learning Applications in Electronic Design Automation*. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 277-306. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-13074-8_11.
- [12] V. Paxson, "End-to-end routing behavior in the internet", *ACM SIGCOMM Comput. Communication Rev.*, vol. 36, no 5, pp. 41-56, Oct. 2006. doi: <https://doi.org/10.1145/1163593.1163602>.
- [13] M. Al. Jameel, T. Kanakis, S. Turner, A. Al-Sherbaz, and W. S. Bhaya, "A reinforcement learning-based routing for real-time multimedia traffic transmission over software-defined networking", *Electronics*, vol. 11, no 15, art. 2441, Sept. 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11152441>.
- [14] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and P. P. Sahu, "Priority based routing and wavelength assignment with traffic grooming for optical networks", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 4, is. 6, pp. 480-489, May 2012. doi: <https://doi.org/10.1364/jocn.4.000480>.
- [15] K. T. Chen, C. C. Tu, and W. C. Xiao, "OneClick: A Framework for Measuring Network Quality of Experience", in *Proc. 2009 IEEE INFOCOM*, Rio De Janeiro, Brazil, April, 19-25, 2009. IEEE, 2009, pp. 702-710. doi: <https://doi.org/10.1109/infcom.2009.5061978>.
- [16] J. Liu et al., "EAGLE: Heterogeneous GNN-based Network Performance Analysis", in *Proc. 2023 IEEE/ACM 31st Int. Symp. Qual. Service (IWQoS)*, Orlando, FL, USA, June, 19-21, 2023. 10 p. IEEE, 2023. doi: <https://doi.org/10.1109/iwqos57198.2023.10188804>.
- [17] K. Hedayat, R. Krzanowski, A. Morton, K. Yum, and J. Babiarz, "RFC 5357: A Two-Way Active Measurement Protocol (TWAMP)", RFC Editor, Oct. 2008. doi: <https://doi.org/10.17487/rfc5357>.
- [18] K. Ramasamy, and D. Medhi, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*. Elsevier Science & Technology Books, 2017.
- [19] K. H. Rosen, *Discrete Mathematics and Its Applications*, NY, USA: McGraw-Hill Companies, 2012.
- [20] Y. V. Nikolsky, V. V. Pasichnyk, and Yu. M. Shcherbina, "Discrete Mathematics", Kyiv, Ukraine: BHV Publishing Group, 2007.

VALERII NAZAREVYCH,
ARTEM MYKYTIUK,
OLHA SHEVCHUK,
IHOR KULYK

A METHOD OF SECURE NETWORK TRAFFIC ROUTING BASED ON SPECIFIED CRITERIAS

Due to the implementation of new network services, the increase amount of data that need to be transmitted, and the use of networks in various sectors with diverse communication requirements, there is a need to develop new approaches to ensure the quality of such communications. Leading network equipment manufacturers and standardization organizations are developing new routing algorithms, resulting in the introduction of new routing protocols or improvements to existing ones. However, all these algorithms cover routing principles for general-purpose networks and do not consider the communication requirements of specialized networks. Therefore, the task arises to research optimization directions for network traffic routing, define optimization criteria, and further develop a method for secure network traffic

routing based on the specified criteria. In this work, a routing method is proposed that takes into account the defined requirements when searching for the optimal route. In the case of dynamic routing, each router calculates the shortest routes to all other networks based on the shortest path search algorithm. This work defines a method for calculating metrics based on specified criteria and formally describes the algorithm for finding the shortest path. Quality of communication criteria is introduced, which will enable meeting communication requirements in specialized networks. Calculation methods for these criteria are demonstrated, and data collection methods for the calculation of specified criteria are determined. A formula for calculating metrics is proposed, which includes the possibility of selecting T-values and determining their numerical parameters to prioritize specific criteria. Default values for criteria are defined, and metric calculations are tested by default for different types of interfaces. After calculating metrics, the task reduces to finding the shortest paths in a weighted graph using an algorithm based on Dijkstra's algorithm. The proposed algorithm for finding the shortest path involves identifying the primary (shortest) and backup paths from a given source vertex to all other graph vertices. A formal description of the proposed algorithm is provided.

Keywords: routing, metric, telemetry, TWAMP, shortest path search algorithm.

Назаревич Валерій Валерійович, старший інженер лабораторії кафедри кібербезпеки і застосування інформаційних систем і технологій, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0009-0007-9721-1101, valeriy.nazarevych@gmail.com.

Микитюк Артем В'ячеславович, заступник завідувача кафедри кібербезпеки і застосування інформаційних систем і технологій, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0002-8307-9978, mukuta8888@gmail.com.

Шевчук Ольга Сергіївна, викладач кафедри кібербезпеки і застосування інформаційних систем і технологій, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0002-2866-439X, olia13511@gmail.com.

Кулик Ігор Анатолійович, студент, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0009-0004-4565-6270, ihorkulyk11@gmail.com.

Nazarevych Valerii, senior laboratory engineer at the state cybersecurity and application of information systems and technologies academic department, Institute of special communication and information protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.

Mykytiuk Artem, deputy head of the cybersecurity and application of information systems and technologies academic department, Institute of special communication and information protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.

Shevchuk Olha, lecturer at the state cybersecurity and application of information systems and technologies academic department, Institute of special communication and information protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.

Kulyk Ihor, student, Institute of special communication and information protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.