

УДК 621.391

# ВДОСКОНАЛЕНА МОДЕЛЬ БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ



[О.В. ЛЕМЕШКО](#), [А.О. КРУГЛОВА](#), [А.С. ЖУРАВЛЬОВА](#), [В.О. ЛЕМЕШКО](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Abstract** – The paper proposes an improved mathematical model of load balancing in the infocommunication network (ICN), corresponding to the Traffic Engineering (TE) concept principles. The model mathematically formalizes the case of ICN construction when each access network is switched simultaneously to not one but to several border routers to increase fault tolerance. Therefore, it is proposed to improve the load balancing level in the ICN according to the TE criterion by ensuring the distribution of traffic at the access level between several border routers that create a default virtual gateway. The proposed mathematical model is based on the conditions of implementation of single or multipath routing; load balancing at the access level; flow conservation at the access level and the network itself; overload prevention of communication links, which act as conditions for load balancing in ICN. Within the proposed model, the load balancing task in ICN is formulated as an optimization problem of mixed-integer linear programming. The results of the study confirmed the effectiveness of the proposed solution. Ensuring coordinated load balancing at both access and core network levels, in general, has increased network performance by 25.45% compared to a solution based on multipath routing, but without access level balancing, and 2.76 times compared to the model in which load balancing in the ICN was absent. Within the available load for each of the compared models, the use of the proposed solution allowed to reduce the upper bound of the network links utilization by an average from 20% to 60%. Lowering the upper bound of the network links utilization positively affects the quantitative values of the main Quality of Service indicators – the average end-to-end delay, jitter, and packet loss probability.

**Анотація** – У роботі запропоновано вдосконалену математичну модель балансування навантаження в інфокомунікаційній мережі (ІКМ), яка відповідає принципам концепції Traffic Engineering (TE). Модель математично формалізує випадок побудови ІКМ, коли кожна мережа доступу для підвищення відмовостійкості комутується одночасно не до одного, а до декількох приграничних маршрутизаторів. Тому пропонується покращити рівень балансування навантаження в ІКМ за критерієм TE шляхом забезпечення розподілу трафіка на рівні доступу між декількома приграничними маршрутизаторами, які створюють віртуальний шлюз за замовчуванням. Запропонована математична модель ґрунтується на умовах реалізації одно або багатошляхової маршрутизації; балансування навантаження на рівні доступу; збереження потоку на рівні доступу та самої мережі; запобігання перевантаження каналів зв'язку, які фактично виступають умовами балансування навантаження в ІКМ. В межах запропонованої моделі задача балансування навантаження в ІКМ сформульована як оптимізаційна задача змішаного цілочисельного лінійного програмування. Результати проведеного дослідження підтвердили ефективність запропонованого рішення. Забезпечення погодженого балансування навантаження як на рівні доступу, так і рівні ІКМ взагалі дозволило підвищити продуктивність мережі на 25,45% у порівнянні з рішенням, що базувалось на багатошляховій маршрутизації, але без балансування на рівні доступу, та у 2,76 разів у порівнянні з моделлю, при якій балансування навантаження в ІКМ було відсутнє. В межах доступного для кожної з порівнюваних моделей навантаження використання запропонованого рішення дозволило знизити верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі у середньому від 20 до 60%. Зниження верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку позитивно впливає на кількісні значення основних показників якості обслуговування – середньої міжкінцевої затримки, джитеру та ймовірності втрат пакетів.

## Вступ

Відомо [1, 2], що в інфокомунікаційній мережі (ІКМ) значення основних показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS), до яких відносять, перш за все, її пропускну здатність, середню затримку, джитер та ймовірність втрат пакетів, на пряму залежать від рівня завантаженості каналів зв'язку та маршрутів. Тому при розв'язанні широкого кола мережних задач щодо управління трафіком активно впроваджуються положення концепції Traffic Engineering (TE) [3-6]. Метою даної концепції

є забезпечення збалансованого використання (завантаження) мережного ресурсу – каналів зв'язку та буферу черг.

Одним з напрямів впровадження принципів ТЕ в ІКМ є вдосконалення протоколів маршрутизації, яке стосується підтримки багатошляхової стратегії маршрутизації. Більшість існуючих маршрутних протоколів здобули розширення Traffic Engineering, оновлено називаючись OSPF-TE, IS-IS-TE тощо. Однак в цих протоколах підвищення функціональності щодо підтримки багатошляхової маршрутизації стосується переважно модифікацій на програмному рівні, бо як і раніше вони базуються на досить примітивних алгоритмах пошуку найкоротшого шляху на графі, які не орієнтовані на забезпечення керованого балансування навантаження за множиною шляхів. Тому, наприклад, протоколи RIP та OSPF підтримують рівномірне балансування навантаження лише за шляхами з однаковою метрикою [7-9], а протокол EIGRP дозволяє балансувати навантаження шляхами з різною метрикою завдяки лише обов'язковим додатковим налаштуванням, що значно підвищує вимоги до фахового рівня мережних адміністраторів.

Забезпечити високоефективне балансування навантаження в ІКМ засобами маршрутизації можна лише шляхом удосконалення відповідних математичних моделей і методів, які б слугували теоретичною основою перспективних рішень у цій області. Науковцями за останні роки запропоновано множину математичних моделей маршрутизації, в яких балансування навантаження в ІКМ реалізується на принципах Traffic Engineering [10-20]. Відомі теоретичні ТЕ-рішення зазвичай орієнтовані на врахування пропускну здатності каналів зв'язку, а також характеристик трафіка, що протікає в ІКМ. У роботах [21, 22] ТЕ-моделі маршрутизації розширили свої можливості на врахування також параметрів безпеки каналів зв'язку, неоднорідної топології мережі, а також процесів профілювання трафіку в ІКМ.

У даній статті пропонується розвинути підхід, який описується в роботі [23] та стосується організації відмовостійкої маршрутизації із захистом шлюзу за замовчуванням, коли мережі доступу комутуються для підвищення надійності не до одного, а одночасно до декількох приграничних маршрутизаторів. Водночас відомі протоколи захисту шлюзу за замовчуванням, наприклад, VRRP, GLBP і CARP, підтримують балансування навантаженнями між інтерфейсами декількох приграничних маршрутизаторів, які створюють так званий віртуальний шлюз за замовчуванням. Тому, якщо забезпечити балансування навантаження на рівні доступу, то це має покращити збалансованість завантаженості ІКМ загалом.

## **I. Потокова модель маршрутизації з балансуванням навантаження в інфокомунікаційній мережі**

Нехай структура ІКМ (рис. 1) описується за допомогою графа  $\Gamma = (M, L)$  (рис. 2). Множина вершин графа  $M = R \cup V$  містить дві підмножини:  $R = \{R_i, i = \overline{1, m}\}$  –

підмножина вершин, що моделюють маршрутизатори,  $V = \{V_j, j = \overline{1, v}\}$  – підмножина вершин, що описують мережі доступу [10, 23].

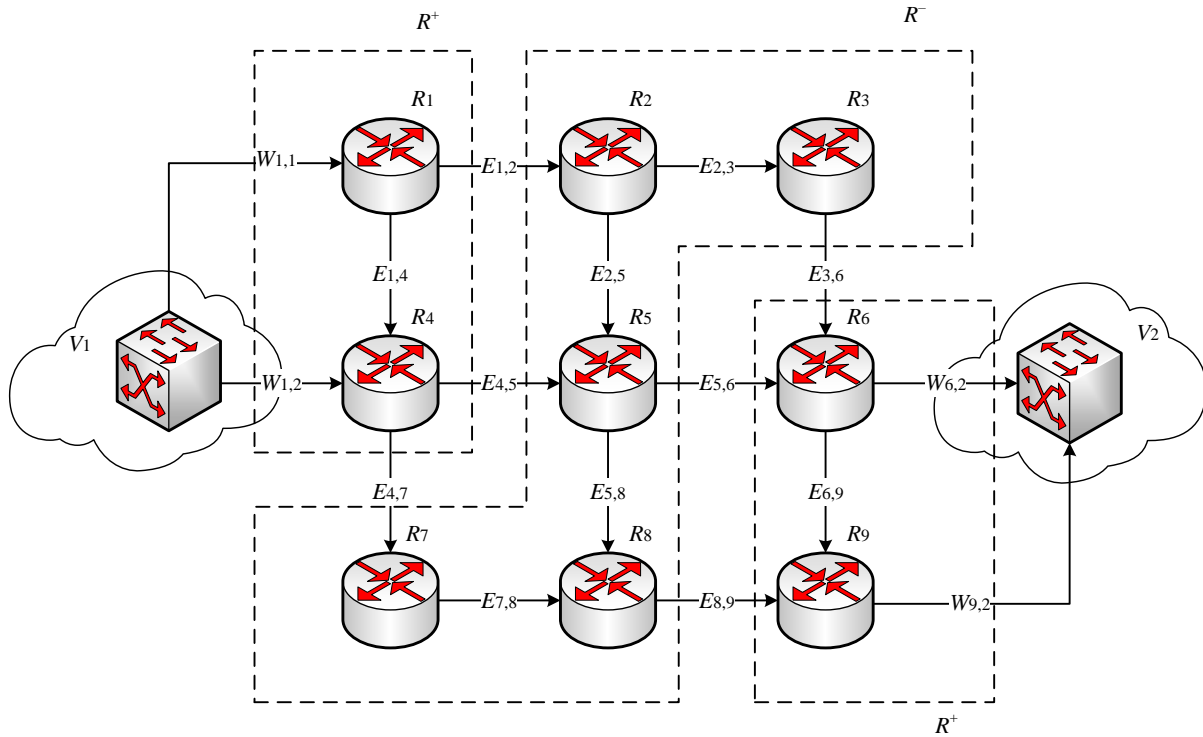


Рис. 1. Приклад структури ІКМ

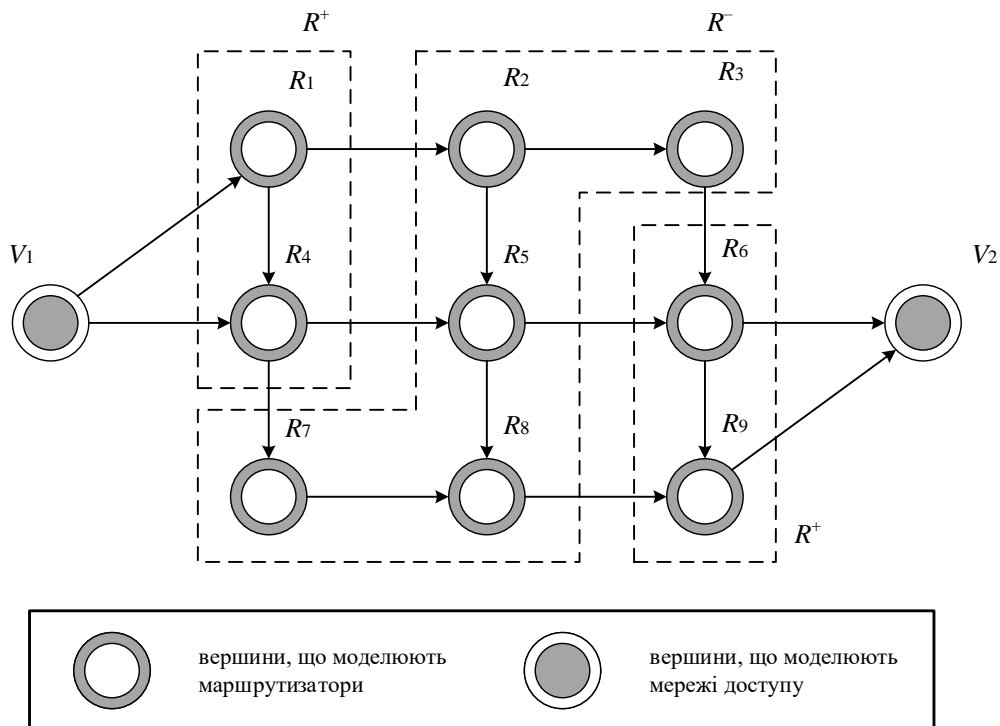


Рис. 2. Графова модель ІКМ

Множина вершин також складається з двох підмножин, тобто  $R = R^+ \cup R^-$ . Водночас  $R^+$  – підмножина вершин, що моделюють приграничні маршрутизатори ІКМ, тобто маршрутизатори, до яких можуть бути підключені мережі доступу, де  $m^+ = |R^+|$  – загальна кількість приграничних маршрутизаторів;  $R^-$  – підмножина вершин, що моделюють транзитні маршрутизатори, де  $m^- = |R^-|$  – їхня кількість в ІКМ.

Нехай  $R_j^+$  – підмножина множини  $R^+$ , що моделює ті приграничні маршрутизатори, які утворюють віртуальний маршрутизатор мережі доступу  $V_j$ . Позначимо через  $m_j^+ = |R_j^+|$  – загальну кількість приграничних маршрутизаторів, що утворюють віртуальний маршрутизатор для мережі доступу  $V_j$ . Наприклад, як показано на рис. 1, для першої мережі доступу віртуальним маршрутизатором є множина маршрутизаторів, представлених вершинами  $R_1$  та  $R_4$ , тобто  $m_1^+ = 2$ .

Множина дуг  $L = E \cup W$  графа  $\Gamma$  (рис. 2) складається також з двох підмножин:  $E = \{E_{i,j}, i, j = \overline{1, m}, i \neq j\}$  – множина каналів зв'язку ІКМ,  $W = \{W_{i,j}, i = \overline{1, v}, j = \overline{1, m^+}\}$  – множина ліній доступу, що з'єднують мережі доступу та приграничні маршрутизатори.

Нехай в ІКМ циркулюють пакети множини потоків, яку позначимо через  $K$ . Тоді кожному  $k$ -му потоку ( $k \in K$ ) відповідає низка параметрів:  $V_s^k$  – мережа доступу, що є джерелом пакетів;  $V_d^k$  – мережа доступу, що є отримувачем цього потоку пакетів;  $\lambda^k$  – середня пакетна інтенсивність  $k$ -го потоку (1/с). Тоді в процесі розв'язання задачі маршрутизації з балансуванням навантаження в ІКМ необхідно розрахувати такі три типи керуючих змінних:  $x_{i,j}^k$  – маршрутна змінна, що характеризує частку  $k$ -го потоку в каналі зв'язку, представленого дугою  $E_{i,j}$ ;  $y_{i,j}^k$  – змінна доступу, що визначає частку  $k$ -го потоку, який протікає в лінії доступу, представленій дугою  $W_{i,j}$ ;  $z_{j,i}^k$  – змінна доступу, яка характеризує частку  $k$ -го потоку, що протікає в лінії доступу, представленій дугою  $W_{j,i}$  [10, 23].

На маршрутні змінні  $x_{i,j}^k$  у разі використання одношляхової маршрутизації потоків в ІКМ накладаються такі обмеження:

$$x_{i,j}^k \in \{0; 1\}, \quad (1)$$

а при реалізації багатошляхової маршрутизації –

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (2)$$

Якщо мережа доступу взаємодіє лише з одним з приграничних маршрутизаторів ІКМ, то на змінні доступу накладаються обмеження виду

$$y_{i,j}^k \in \{0;1\} \text{ і } z_{j,i}^k \in \{0;1\}. \quad (3)$$

У випадку підтримки балансування навантаження на рівні доступу, як це реалізовано в протоколах VRRP, GLBP і CARP [10, 23], на ці ж змінні накладаються умови, аналогічні до (2):

$$0 \leq y_{i,j}^k \leq 1 \text{ і } 0 \leq z_{j,i}^k \leq 1. \quad (4)$$

Для забезпечення збереження потоку на рівні доступу на відповідні керуючі змінні накладаються додаткові умови-обмеження:

$$\sum_{R_j \in R_p^+} y_{p,j}^k = 1, \quad V_p = V_s^k; \quad (5)$$

$$\sum_{R_j \in R_h^+} z_{j,h}^k = 1, \quad V_h = V_d^k. \quad (6)$$

Умови збереження потоку на рівні ІКМ загалом мають наступний вигляд [10, 23]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 0; k \in K, R_i \in R^-; \\ \sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = y_{p,i}^k; k \in K, R_i \in R^+, V_p = V_s^k; \\ \sum_{j: E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = -z_{i,h}^k; k \in K, R_i \in R^+, V_h = V_d^k. \end{array} \right. \quad (7)$$

Виконання умов (7) дозволяє забезпечити взаємозв'язок під час розрахунку керуючих змінних всіх трьох типів, а відповідно і скоординувати процеси балансування навантаження на рівні доступу та ІКМ взагалі.

Як показано у роботі [11], для забезпечення балансування навантаження в ІКМ на принципах ТЕ в модель вводяться умови запобігання перевантаження такого виду:

$$\sum_{k \in K} \lambda^k x_{i,j}^k \leq \alpha \varphi_{i,j}, \quad (8)$$

де  $\varphi_{i,j}$  – пропускна здатність каналу зв'язку, який описується дугою  $E_{i,j}$ ;  $\alpha$  – верхній поріг завантаженості каналів зв'язку ІКМ, що виступає такою додатковою керуючою змінною, на значення якої накладаються такі обмеження:

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (9)$$

Тоді задачу балансування навантаження в ІКМ можна сформулювати в оптимізаційній формі. Критерієм оптимальності за аналогією до [11] буде виступати умова

$$\min_{x,y,z,\alpha} \alpha, \quad (10)$$

а обмеженнями – умови (1)-(9).

Залежно від особливостей постановки технологічного завдання балансування навантаження оптимізаційна задача (10) буде відноситись до того чи іншого класу (табл. 1). У випадку булевого характеру будь-якої з керуючих змінних  $x_{i,j}^k$ ,  $y_{i,j}^k$  та  $z_{j,i}^k$ , тобто за наявності умов (1) та/або (3) задача балансування навантаження формулюється як оптимізаційна задача змішаного цілочисельного лінійного програмування, оскільки змінна  $\alpha$  приймає дійсні значення. Коли ж балансування навантаження буде реалізуватись як на рівні доступу (4), так і в ІКМ загалом (2), то сформульована оптимізаційна задача буде відноситись вже до класу задач лінійного програмування.

Таблиця 1. Класифікація оптимізаційних задач балансування навантаження в ІКМ

№ моделі	Рівень доступу	Рівень ІКМ	Тип оптимізаційної задачі
Модель 1	Без балансування навантаження (3)	Без балансування навантаження, одношляхова маршрутизація (1)	Задача змішаного цілочисельного лінійного програмування
Модель 2		З балансуванням навантаження, багатошляхова маршрутизація (2)	Задача змішаного цілочисельного лінійного програмування
Модель 3	З балансуванням навантаження (4)		Задача лінійного програмування

## II. Дослідження процесів балансування навантаження в ІКМ

Нехай, як показано на рис. 1, джерелом потоку пакетів є мережа доступу  $V_1$ , а отримувачем пакетів цього потоку є мережа доступу  $V_2$ . Пропускні здатності каналів зв'язку представлені в табл. 2.

Таблиця 2. Пропускні здатності каналів зв'язку транспортної мережі

Канал зв'язку	$E_{1,2}$	$E_{2,3}$	$E_{1,4}$	$E_{2,5}$	$E_{3,6}$	$E_{4,5}$
Пропускна здатність, 1/с	550	180	620	170	200	350
Канал зв'язку	$E_{5,6}$	$E_{4,7}$	$E_{5,8}$	$E_{6,9}$	$E_{7,8}$	$E_{8,9}$
Пропускна здатність, 1/с	250	150	210	290	180	260

В процесі дослідження порівнювалась ефективність розв'язання задачі балансування навантаження в ІКМ за допомогою трьох варіантів моделі (табл. 1). Інтенсивність потоку змінювалась від 10 до 700 1/с. Динаміку зміни верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку ІКМ залежно від інтенсивності потоку пакетів, який надходив до мережі, показано на рис. 3.

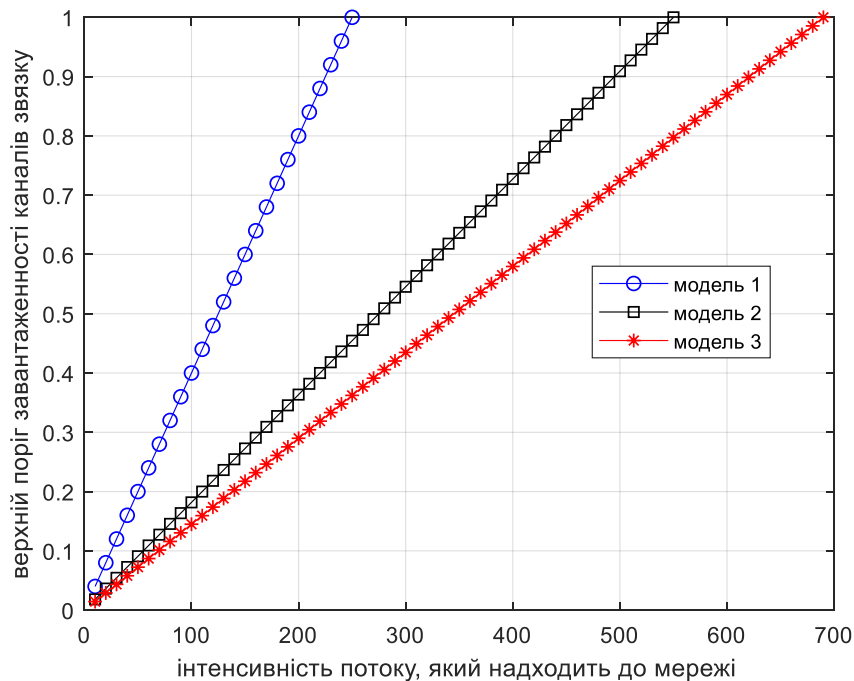


Рис. 3. Динаміка зміни верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку ІКМ залежно від інтенсивності потоку пакетів, який надходив до мережі

Як показано на рис. 3, за відсутності балансування навантаження на рівні доступу та ІКМ загалом (модель 1) перевантаження мережі відбувалось вже при  $\lambda > 250$  1/с. На рис. 4 показано порядок розподілу трафіка без балансування навантаження на рівні доступу та одношляховій маршрутизації та рівні ІКМ при  $\lambda = 200$  1/с. Весь потік пакетів в ІКМ від першої мережі доступу надходив на четвертий приграничний маршрутизатор і далі до другої мережі доступу передавався за маршрутом  $R_4 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6$ .

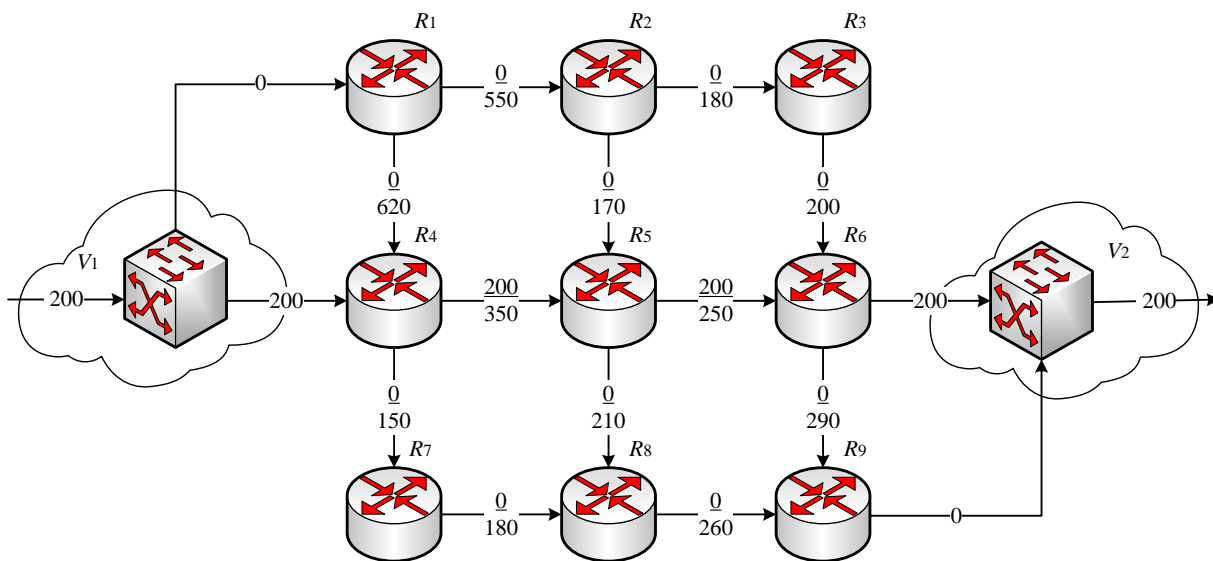


Рис. 4. Порядок розподілу трафіка без балансування навантаження на рівні доступу та одношляховій маршрутизації та рівні ІКМ

У випадку реалізації багатошляхової маршрутизації в ІКМ, але без балансування навантаження між приграничними маршрутизаторами (модель 2) мережа могла обслужити потік пакетів з максимальною інтенсивністю в 550 1/с, що є в 2,2 рази більшим у порівнянні з моделлю 1. На рис. 5 показано порядок розподілу трафіка без балансування навантаження на рівні доступу та багатошляховій маршрутизації та рівні ІКМ при  $\lambda = 500$  1/с.

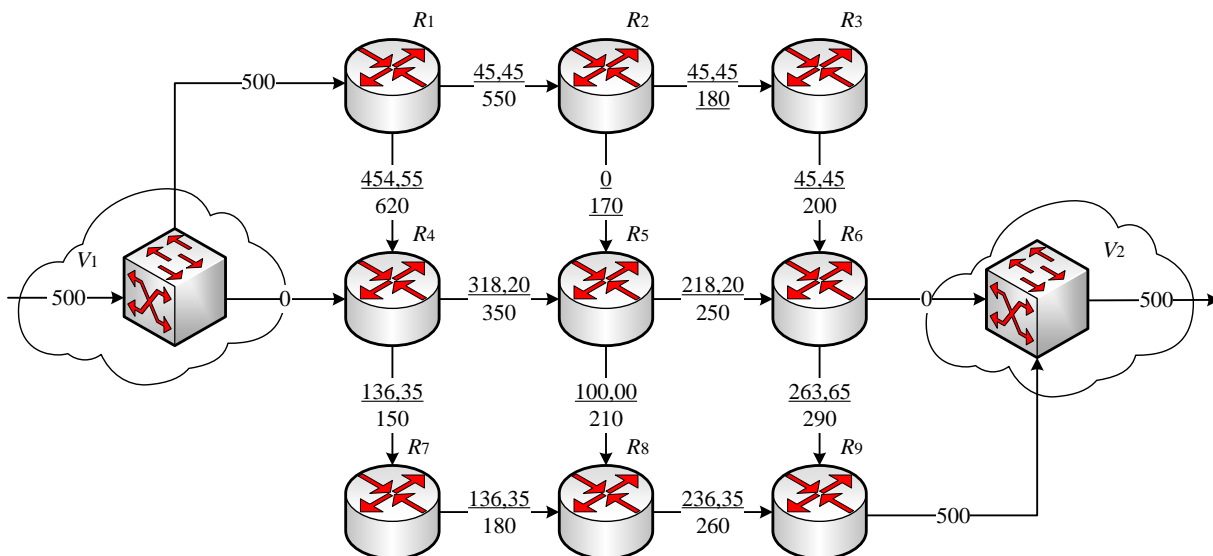


Рис. 5. Порядок розподілу трафіка без балансування навантаження на рівні доступу та багатошляховій маршрутизації та рівні ІКМ



Весь потік пакетів у ІКМ від першої мережі доступу надходив на перший приграничний маршрутизатор і далі до другої мережі доступу передавався за чотирма маршрутами:

$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$  з інтенсивністю 45,45 1/с;

$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$  з інтенсивністю 218,2 1/с;

$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$  з інтенсивністю 100 1/с;

$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$  з інтенсивністю 136,35 1/с.

Коли ж балансування реалізувалось як на рівні доступу, так і на рівні ІКМ (модель 3), мережа спромоглась обслужити потік пакетів з максимальною інтенсивністю в 690 1/с, що на 25,45 % більше у порівнянні з моделлю 2 та в 2,76 разів більше у порівнянні з моделлю 1. На рис. 6 показано порядок балансування навантаження на рівнях доступу та ІКМ при  $\lambda = 500$  1/с.

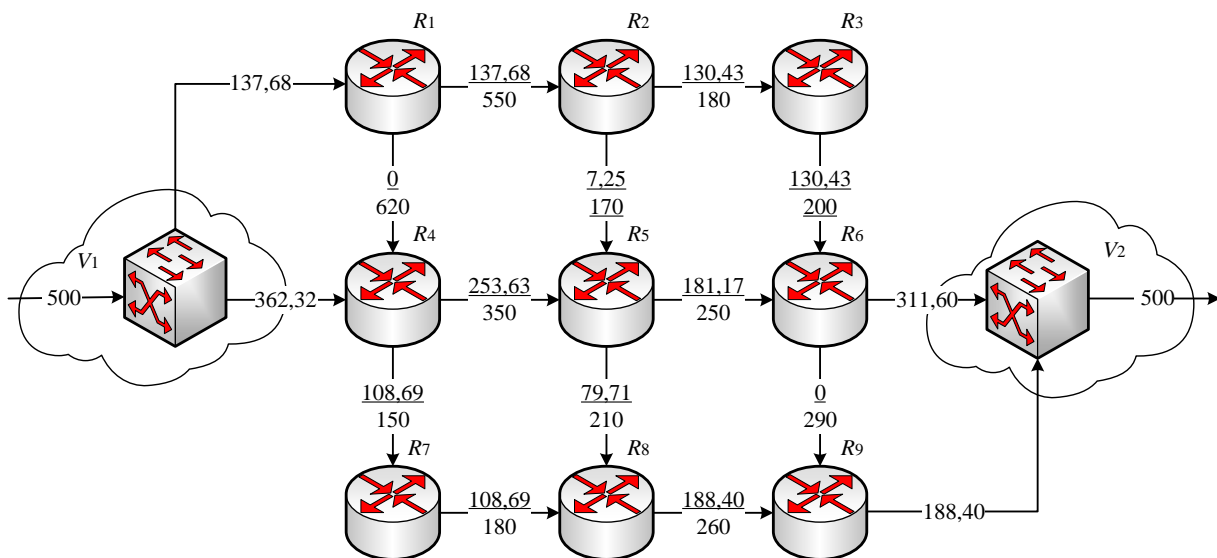


Рис. 6. Порядок балансування навантаження на рівнях доступу та ІКМ

Балансування потоку пакетів, який надходив від першої мережі доступу, здійснювалось між першим і четвертим маршрутизаторами у пропорції 27,5 на 72,5 %. Далі в ІКМ до другої мережі доступу трафік передавався за п'ятьма маршрутами:

$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6$  з інтенсивністю 130,43 1/с;

$R_4 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6$  з інтенсивністю 181,17 1/с;

$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$  з інтенсивністю 7,25 1/с;

$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$  з інтенсивністю 72,46 1/с;

$R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$  з інтенсивністю 108,69 1/с.

Тобто з ІКМ до другої мережі доступу трафік надходив через шостий і дев'ятий маршрутизатори у пропорції 62,3 на 37,7%.

Аналіз отриманих на рис. 3 результатів показав, що реалізація закладених у модель 3 принципів балансування навантаження дозволила знизити верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі (9) у середньому на 63,77% у порівнянні з моделлю 1 та на 20,29% у порівнянні з моделлю 2. Використання моделі 2 орієнтує на покращення показника (9) у порівнянні з моделлю 1 у середньому на 54,55%.

## Висновки

У роботі запропоновано вдосконалену математичну модель балансування навантаження в інфокомунікаційній мережі, що відповідає принципам концепції Traffic Engineering. Модель (1)-(10) математично формалізує випадок побудови ІКМ, коли кожна мережа доступу для підвищення відмовостійкості комутується одночасно не до одного, а до декількох приграничних маршрутизаторів. Тому пропонується покращити рівень балансування навантаження в ІКМ за критерієм (10) шляхом забезпечення розподілу трафіка на рівні доступу між декількома приграничними маршрутизаторами, які створюють віртуальний шлюз за замовчуванням.

Запропонована математична модель ґрунтується на умовах реалізації одно- або багатошляхової маршрутизації (1) і (2); умов балансування навантаження на рівні доступу (3) та (4); умов збереження потоку на рівні доступу (5), (6) і самої мережі (7); умов запобігання перевантаження каналів зв'язку (8), які фактично виступають умовами балансування навантаження в ІКМ. У межах запропонованої моделі завдання балансування навантаження в ІКМ сформульовано як оптимізаційну задачу змішаного цілочисельного лінійного програмування (табл. 2) з критерієм оптимальності (10) та обмеженнями, які накладаються на керуючі змінні (1)-(9).

Результати проведеного дослідження підтвердили ефективність запропонованого рішення. Забезпечення погодженого балансування навантаження як на рівні доступу, так і рівні ІКМ загалом, дозволило підвищити продуктивність мережі (рис. 3) на 25,45% у порівнянні з рішенням, що базувалось на багатошляховій маршрутизації, але без балансування на рівні доступу, та у 2,76 разів у порівнянні з моделлю, при якій балансування навантаження в ІКМ було відсутнє. В межах доступного для кожної з порівнюваних моделей навантаження використання запропонованого рішення дозволило знизити верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі (9) у середньому на 63,77% у порівнянні з моделлю 1 та на 20,29% у порівнянні з моделлю 2. Зниження верхнього порогу завантаженості каналів зв'язку позитивно впливає на кількісні значення основних показників якості обслуговування – середньої міжкінцевої затримки, джитеру та ймовірності втрат пакетів.

## Список літератури

1. *Barreiros, M., Lundqvist, P.* (2016), QoS-Enabled Networks: Tools and Foundations, 2nd edition. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley, 254 p.
2. *Stallings, W.* (2016), Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud, 1st edition, Pearson Education Inc., 510 p.

3. Osborne, E. D., Simha, A. (2003), Traffic engineering with MPLS, Cisco Press, 608 p.
4. Munemitsu, T., Kotani, D., Okabe, Y. (2018), "A Mixed Integer Programming Solution for Network Optimization Under Tunneling-Based Traffic Engineering Schemes", Proceedings of the 42nd Annual IEEE Conference on Computer Software and Applications Conference (COMPSAC) 2018, Tokyo, Japan, 23-27 July, P. 769-776. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2018.10335>
5. Shu, Z., Wan, J., Lin, J., Wang, S., Li, D., Rho, S., Yang, C. (2016), "Traffic engineering in software-defined networking: Measurement and management", IEEE Access, No. 4, P. 3246–3256. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2016.2582748>
6. Mendiola, A., Astorga, J., Jacob, E., Higuero, M. (2017), "A survey on the contributions of Software-Defined Networking to Traffic Engineering", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Second quarter, No. 19(2), P. 918-953. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2633579>
7. Medhi, D., Ramasamy, K. (2018), Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures (The Morgan Kaufmann Series in Networking) 2nd Edition, Cambridge, MA, USA: Elsevier Inc., 1018 p.
8. Misra, S., Goswami, S. (2017), Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies, 1st Edition, Wiley, 536 p.
9. Uysless, D. B. (2000), IP routing protocols: RIP, OSPF, BGP, PNNI and Cisco routing protocols, Prentice Hall PTR, 287 p.
10. Лемешко, О. В., Єременко, О. С., Невзорова, О. С. (2020), Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість, Харків: ХНУРЕ, 308 с.
11. Seok, Yo., Lee, Yo., Choi, Ya., Kim, C. (2002), "A constrained multipath traffic engineering scheme for MPLS networks", Proceedings of the IEEE International Conference "International Conference on Communications ICC 2002 (Cat. No.02CH37333)", New York, 28 April-2 May, P. 2431-2436. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2002.997280>
12. Wang, N., Ho, K., Pavlou, G., Howarth, M. (2008), "An overview of routing optimization for internet traffic engineering", IEEE Communications Surveys & Tutorials, No. 1(10), P. 36-56. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2008.4483669>
13. Tomovic, S., Radusinovic, I. (2017), "Traffic engineering approach to virtual-link provisioning in software-defined ISP networks", Proceedings of the 25th Telecommunication Forum TELFOR 2017, Belgrade, Serbia, 21-22November, P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2017.8249296>
14. Robinson, M., Milosavljevic, M., Kourtessis, P., Fisher, S., Stafford, G. P., Treiber, J., Burrell, M. J., Senior, J. M. (2017), "QoE based holistic traffic engineering in SDN enabled heterogeneous transport networks", Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTON.2017.8024878>
15. Yang, S., Xu, C., Zhong, L., Shen, J., Muntean, G. M. (2019), "A QoE-Driven Multicast Strategy With Segment Routing—A Novel Multimedia Traffic Engineering Paradigm", IEEE Transactions on Broadcasting, No. 66(1), P. 34-46. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBC.2019.2932338>
16. Lemeshko, O., Yeremenko, O. (2017), "Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks", Journal of Electrical Engineering, No. 68(6), P. 444-454. DOI: <https://doi.org/10.1515/jee-2017-0079>
17. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Hailan, A. M., Yevdokymenko, M., Shapovalova, A. (2020), "Policing Based Traffic Engineering Fast ReRoute in SD-WAN Architectures: Approach Development and Investigation", Al-Bakry A. et al. (Eds.), New Trends in Information and Communications

Technology Applications, NTICT 2020, Communications in Computer and Information Science, No. 1183, Springer, Cham, P. 29-43. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55340-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55340-1_3)

18. Lemeshko, O., Nevzorova, O., Hailan, A. M. (2018), "Hierarchical Method of Routing and Resource Allocation in DiffServ-TE Network", Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 20-24 February, P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336366>

19 Лемешко, А. В., Хайлан, А. М. (2010), "Многоуровневое управление трафиком в сети MPLS-TE DiffServ на основе координационного принципа прогнозирования взаимодействий", Проблемы телекомунікацій, No. 1(1), С. 35-44. Режим доступу: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/101\\_lemeshko\\_traffic.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/101_lemeshko_traffic.pdf)

20. Лемешко, А. В., Ильяшенко, А. Е., Коваленко, Т. Н., Невзорова, Е. С. (2018), "Разработка и анализ диакоптического метода междоменной маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационной сети", Проблемы телекомунікацій, No. 1(22), С. 3-24. Режим доступу: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181\\_lemeshko\\_diaoptic.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181_lemeshko_diaoptic.pdf)

21. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Shapovalova, A., Radivilova, T., Ageyev, D. (2020), "Secure Based Traffic Engineering Model in Softwarized Networks", Proceedings of the 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 25-27 November, P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT50783.2020.9349301>

22. Lemeshko, O., Shapovalova, A., Al-Dulaimi, A. M. K., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M. (2020), "Flow-Based Routing Model with Load Balancing under Network Security Parameters", Information and Telecommunication Sciences, No. 2, P. 44-50. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22020.44-50>

23. Lemeshko, O., Yeremenko, O., Tariki, N. (2017), "Solution for the default gateway protection within fault-tolerant routing in an IP network", International journal of electrical and computer engineering systems, No. 8(1), P. 19-26. DOI: <https://doi.org/10.32985/ijeces.8.1.3>