

УДК 621.391

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ПІД ЧАС ВПРОВАДЖЕННЯ СХЕМИ АГРЕГУВАННЯ ПОРТІВ



[Р.С. СИТНИКОВ](#), [В.О. ЛЕМЕШКО](#),

Харківський національний університет радіоелектроніки



[А.В. КРЕПКО](#), [В.В. СТАДНІК](#)

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Abstract – The article is devoted to a relevant scientific and applied problem related to the improvement of potential solutions for increasing the reliability of local networks by means of link (port) aggregation on switches. The article presents a study aimed at a comparative quantitative analysis of the reliability level of a local network in which the mechanism of link (port) aggregation is implemented. The technological task is formulated in the form of a mathematical model for calculating the probability of network uptime with a port aggregation scheme. The boundary values of network reliability indicators are calculated depending on the level of reliability of individual links and the implemented port aggregation scheme, for which the code in MATLAB is written and the corresponding graphs are constructed. It is established that at the level of local networks, the implementation of the mechanism of link (port) aggregation is an effective means of increasing their performance and reliability. The conditions under which this scheme is most appropriate are substantiated. It is demonstrated that in these conditions when implementing the aggregation scheme, it was advisable to limit ourselves to four links. The study results have confirmed the effectiveness of the proposed solution for aggregating links (ports) and allowed us to formulate general recommendations related to the implementation of reliable routing in practice. Consequently, it is proposed to use four aggregated links, provided that the probability of link failure is between 0.5 and 0.7. If the probability of link failure exceeds 0.7, it is advisable to limit the number of aggregated links to two. Further increases in the number of aggregated links affect the cost and performance of the network but do not improve reliability.

Анотація – Стаття присвячена актуальній науково-прикладній задачі, пов'язаній з удосконаленням потенційних рішень щодо підвищення рівня надійності локальних мереж засобами агрегації каналів (портів) на комутаторах. Представлено дослідження з метою порівняльного кількісного аналізу рівня надійності локальної мережі, у якій реалізовано механізм агрегування каналів (портів). Технологічне завдання сформульовано у вигляді математичної моделі розрахунку ймовірності безвідмовної роботи мережі зі схемою агрегування портів. Виконано розрахунки граничних значень показників надійності мережі залежно від рівня надійності окремих каналів і впровадженій схеми агрегування портів, для чого складено код у середовищі MATLAB та побудовано відповідні графіки. Встановлено, що на рівні локальних мереж реалізація механізму агрегування каналів (портів) є дієвим засобом підвищення їхньої продуктивності та надійності. Обґрунтовано умови, за яких найбільш доцільним є використання цієї схеми. Продемонстровано, що в цих умовах при реалізації схеми агрегування доцільно було обмежитись чотирма каналами. Результати проведеного дослідження підтвердили ефективність використання запропонованого рішення щодо агрегування каналів (портів) та дозволили сформулювати загальні рекомендації, пов'язані з реалізацією на практиці надійної маршрутизації. Отже, пропонується використовувати чотири агреговані канали за умови, що ймовірність безвідмовної роботи каналів становить від 0,5 до 0,7. У разі, якщо ймовірність безвідмовної роботи каналів перевищує 0,7, доцільно обмежитися двома каналами. Подальше збільшення кількості агрегованих каналів впливає переважно на вартість і продуктивність мережі, але не покращує показники надійності.

Вступ

Сучасну інформаційно-комунікаційну мережу (ІКМ) можна визначити як складну систему взаємопов'язаних апаратних і програмних засобів, людських ресурсів і обладнання, що використовуються для передачі та отримання різноманітних типів даних. Такі мережі можуть складатися з безлічі кінцевих точок, включаючи комп'ютери користувачів, смартфони та інші електронні пристрої. Функціональність цих мереж оцінюється на декількох рівнях OSI (Open System Interconnection), кожен з них реалізує певні

функції, пов'язані з передачею та обробкою інформації. Ці функції виконуються за допомогою відповідних мережних протоколів і механізмів управління трафіком [1-5].

Однією з найважливіших характеристик ІКМ є її надійність. Надійність – це здатність системи або компонента мережі виконувати необхідні функції за встановлених умов протягом певного періоду часу. Надійність є складовою більш загального поняття стійкості, яка стосується внутрішніх факторів, що впливають на ІКМ, зокрема відмов і несправностей комунікаційного обладнання. Водночас стійкість – це здатність мережі або системи забезпечувати та підтримувати прийнятний рівень обслуговування навіть за умов різноманітних збоїв і порушень нормальної роботи [6, 7].

Для ІКМ забезпечення стійкості еквівалентно максимально успішній підтримці якості обслуговування за показниками пропускну здатності, затримки та джитера, рівня втрат для даної послуги, які можуть бути незадовільними за умови появи відмов і відсутності механізмів компенсації втрат за рахунок резервів. Тому актуальним технологічним завданням у області інфокомунікацій є побудова ІКМ, які забезпечують високі значення показників надійності, відмовостійкості (Quality of Resilience, QoR) та якості обслуговування (Quality of Service, QoS) [8, 9].

Одним з основних засобів забезпечення відмовостійкості ІКМ є резервування елементів мережі та її сегментів. На рівні локальних мереж (LAN) досить часто використовується рішення агрегація каналів (портів комутаторів). Це технологія об'єднання декількох фізичних каналів в один логічний з використанням комутаторів, що мають підтримувати для власних портів функції Link Aggregation або відповідати стандарту IEEE 802.1AX-2020 (“Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Link Aggregation”) [10]. Агрегація каналів дозволяє створювати повнодуплексні з'єднання «точка-точка», які мають вищу сукупну пропускну здатність, ніж окремі з'єднання, що утворюють агрегацію. Це дозволяє більш ефективно використовувати наявні канали в мостових локальних мережах, а також підвищити відмовостійкість у разі виходу з ладу окремих каналів або систем. Крім того, така схема не створює проблем у роботі протоколу STP при побудові остову локальної мережі. Тому у даній статті пропонуються результати дослідження показників надійності локальної мережі під час впровадження схеми агрегування портів на комутаторах.

I. Математична модель розрахунку ймовірності безвідмовної роботи мережі зі схемою агрегування портів

Розглянемо фрагмент мережі, який складається з двох комутаторів другого рівня (S_1, S_4) та двох комутаторів третього рівня (S_2, S_3). Між портами комутаторів S_2 та S_3 агреговано декілька каналів зв'язку (портів), як це показано на рис. 1. Вважається, що до комутаторів S_1 і S_4 підключено кінцеве обладнання користувачів локальної мережі (персональні комп'ютери, ноутбуки тощо) за допомогою безвідмовних каналів

зв'язку. Тому для проведення дослідження впливу схеми агрегування портів на показники надійності локальної мережі достатньо дослідити імовірність безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 та S_4 .

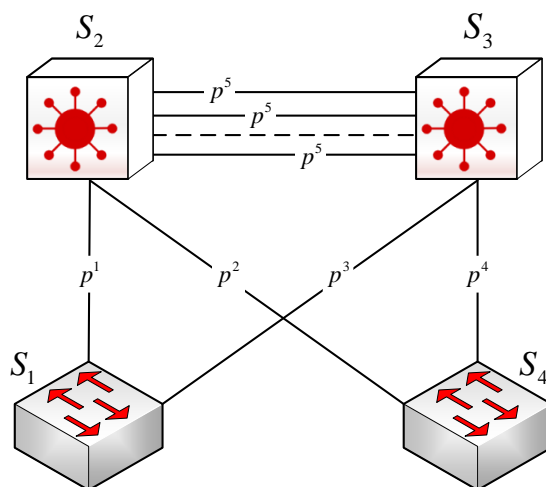


Рис. 1. Топологія фрагменту мережі

Для опису математичної моделі розрахунку імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 та S_4 буде використовуватись система позначень, яку наведено в табл. 1. Топологія фрагменту мережі в межах логіко-імовірнісного підходу [11, 12] може бути представлена у вигляді графа з «містком». «Містком» у мережі (рис. 2) виступає канал між комутаторами S_2 та S_3 .

Таблиця 1. Система позначень

Позначення	Опис
$G = (S, E)$	Граф фрагменту мережі
$S = \{S_i; i = \overline{1, m}\}$	Множина вершин (комутаторів)
$E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$	Множина дуг (каналів зв'язку)
V	Кількість каналів у мережі
p^j	Імовірність безвідмовної роботи j -го каналу ($j = \overline{1, V}$)
q^j	Імовірність відмови j -го каналу ($j = \overline{1, V}$)
n	Цілочисельна змінна, що характеризує кількість агрегованих каналів
p_n^j	Імовірність безвідмовної роботи агрегованого j -го каналу, що складається з n звичайних каналів
q_n^j	Імовірність відмови j -го каналу, що складається з n звичайних каналів
P_{i-j}	Імовірність безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_i та S_j ($i, j = \overline{1, m}; i \neq j$)

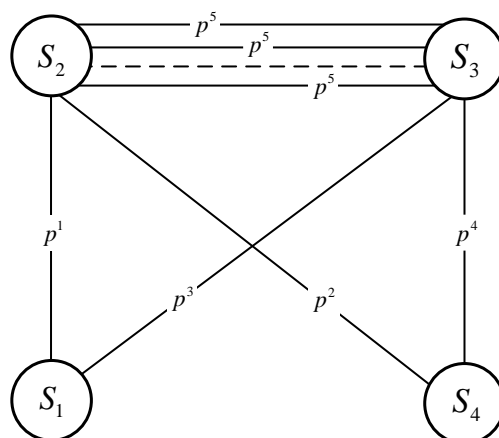


Рис. 2. Граф фрагменту мережі

На рис. 2 використана наскрізна нумерація каналів між комутаторами локальної мережі. При цьому агрегований канал (п'ятий за номером) між комутаторами S_2 та S_3 може складатись з n звичайних каналів.

Тоді для кожного каналу зв'язку мережі буде справедливою така формула:

$$p^j + q^j = 1, (j = \overline{1, V}).$$

Імовірність безвідмовної роботи агрегованого каналу $E_{2,3}$ можна розрахувати наступним чином:

$$p_n^5 = 1 - (1 - p^5)^n. \tag{1}$$

Тоді імовірність відмови каналу $E_{2,3}$ можна виразити такою формулою:

$$q_n^5 = 1 - p_n^5 = (1 - p^5)^n. \tag{2}$$

Фрагмент мережі з «містком» між S_2 і S_3 залежно від крайніх значень імовірності безвідмовної роботи каналу $E_{2,3}$ може набувати варіанти з'єднань, які наведені на рис. 3. Тобто якщо канал $E_{2,3}$ абсолютно надійний ($p_n^5 = 1, q_n^5 = 0$), то фрагмент мережі може бути представлений варіантом, показаним на рис. 3, а. У випадку відмови цього ж каналу ($p_n^5 = 0, q_n^5 = 1$) фрагмент мережі може бути описаний топологією, наведеною на рис. 3, б.

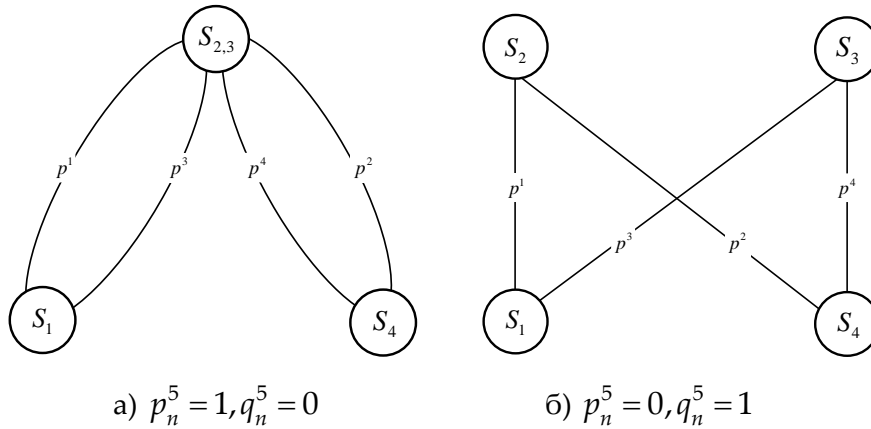


Рис. 3. Варіанти графу мережі залежно від крайніх значень імовірності безвідмовної роботи каналу $E_{2,3}$ між комутаторами S_2 та S_3

Тоді вираз для імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 (рис. 3, а) можна представити у такому вигляді:

$$P_{1-4} = (1 - (1 - p^1)(1 - p^3))(1 - (1 - p^2)(1 - p^4)) = (1 - q^1 q^3)(1 - q^2 q^4). \quad (3)$$

Вираз для імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 за варіантом топології мережі, показаної на рис. 3 б, буде записано таким чином:

$$P_{1-4} = 1 - (1 - p^1 p^2)(1 - p^3 p^4). \quad (4)$$

З урахуванням формул (1)-(4) імовірність безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 за варіантом топології мережі, показаної на рис. 2, можна знайти за допомогою виразу

$$P_{1-4} = \left(1 - (1 - p^5)^n\right) (1 - q^1 q^3)(1 - q^2 q^4) + (1 - p^5)^n \left(1 - (1 - p^1 p^2)(1 - p^3 p^4)\right) \quad (5)$$

II. Дослідження впливу схеми агрегування портів на показники надійності локальної мережі

Розглянемо приклад за умови, що імовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку вважаються однаковими і дорівнюють p . Тоді вираз для імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 набуває наступного вигляду:

$$P_{1-4} = \left(1 - (q)^n\right) \left(1 - (q)^2\right)^2 + (q)^n \left(1 - (1 - (p)^2)^2\right). \quad (6)$$

Код MATLAB для побудови графіка залежності ймовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку за формулою (6), а також графіки цих ймовірностей наведено на рис. 4 та рис. 5 відповідно.

```

1 clear
2 p=0:0.01:1.0;
3 p5 = p; % p5 такий самий, як p
4 q = 1 - p;
5 n=0;% немає агрегованих каналів
6 Ppath0 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
7 n=n+1;% один канал
8 Ppath1 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
9 n=n+1;% два агрегованих канала
10 Ppath2 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
11 n=n+1;% три агрегованих канала
12 Ppath3 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
13 n=n+1;% чотири агрегованих канала
14 Ppath4 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
15 plot(p,Ppath4,'--*k',p,Ppath3,'--m',p,Ppath2,'--g',p,Ppath1,'--b',p,Ppath0,'--or');
16 xlabel('Ймовірності безвідмовної роботи каналів'); ylabel('P_1-4');
17 legend('n=4','n=3','n=2','n=1','n=0');
18 grid on;

```

Рис. 4. Код MATLAB для дослідження залежності ймовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку

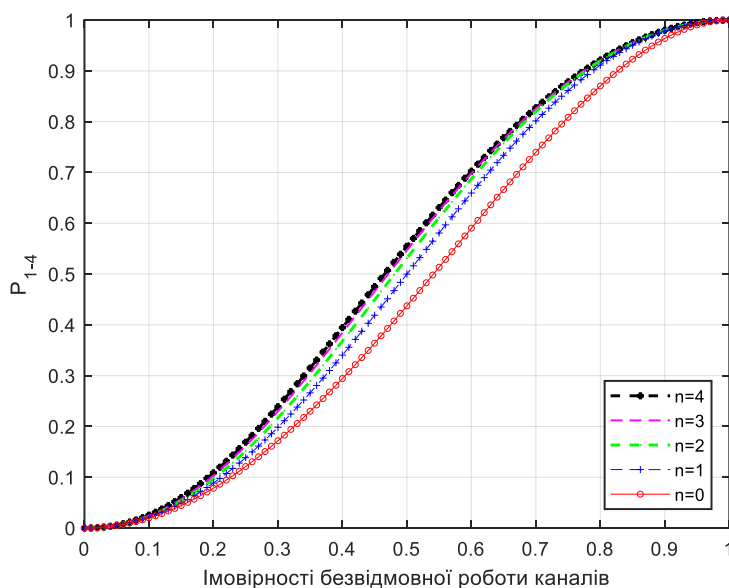


Рис. 5. Залежність ймовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку

Для розуміння граничних значень показників надійності мережі залежно від рівня надійності окремих каналів і впровадженої схеми агрегування портів складено код у середовищі MATLAB (рис. 6) та побудовано відповідний графік (рис. 7). Результати розрахунків наведено у табл. 2.

```

1 clear
2 n=0:1:8;
3 p=0.5; q = 1 - p; p5 = p;% p5 такий самий, як p
4 Ppath05 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
5 p=0.6;q = 1 - p; p5 = p; % p5 такий самий, як p
6 Ppath06 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
7 p=0.7; q = 1 - p; p5 = p;% p5 такий самий, як p
8 Ppath07 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
9 p=0.8;q = 1 - p; p5 = p; % p5 такий самий, як p
10 Ppath08 = (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
11 v05=(Ppath05/Ppath05(1)-1)*100
12 v06=(Ppath06/Ppath06(1)-1)*100
13 v07=(Ppath07/Ppath07(1)-1)*100
14 v08=(Ppath08/Ppath08(1)-1)*100
15 plot(n,Ppath08,'--sm',n,Ppath07,'--og',n,Ppath06,'--*b',n,Ppath05,'--dr');
16 xlabel('Кількість агрегованих каналів'); ylabel('P_1_4'); grid on;
17 legend('p=0,8','p=0,7','p=0,6','p=0,5');
18 grid on;

```

Рис. 6. Код для MATLAB для побудови графіку залежності імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від кількості агрегованих каналів

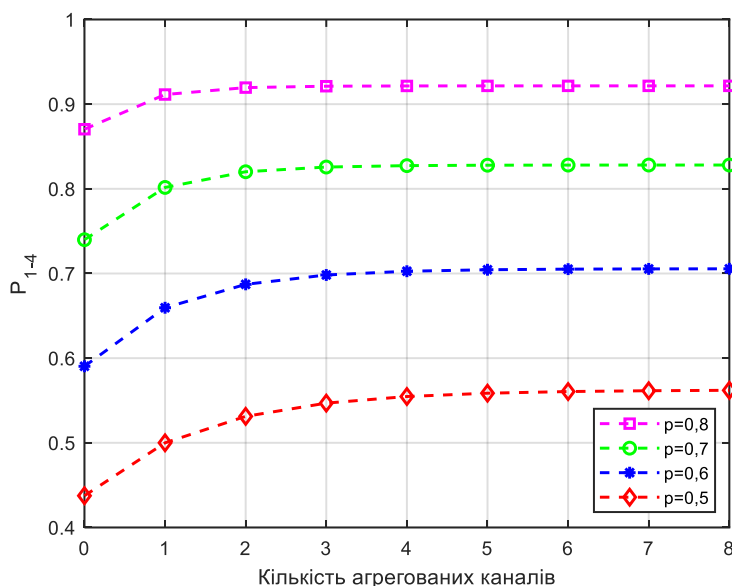


Рис. 7. Залежність імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від кількості агрегованих каналів між комутаторами S_2 і S_3

Таблиця 2. Підвищення імовірності безвідмовної роботи залежно від кількості агрегованих каналів між комутаторами S_2 і S_3 (у відсотках)

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$p = 0,5$	14,29	21,43	25,0	26,79	27,68	28,13	28,35	28,46
$p = 0,6$	11,70	16,39	18,26	19,01	19,31	19,43	19,48	19,50
$p = 0,7$	8,34	10,85	11,6	11,82	11,89	11,91	11,92	11,92
$p = 0,8$	4,71	5,65	5,84	5,87	5,88	5,88	5,88	5,88

Як видно з рис. 5, завдяки наявності у топології мережі «містка» (одного каналу зв'язку між комутаторами S_2 і S_3 , $n = 1$) імовірність безвідмовної роботи з'єднання

між комутаторами S_1 і S_4 залежно від імовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку (в інтервалі $p^j = 0,5 \dots 0,7$) покращує рівень надійності на 8% – 14% у порівнянні з рішенням без «містка» ($n = 0$). Якщо ж наявні два канали зв'язку між комутаторами S_2 і S_3 ($n = 2$), то виграш вже складає від 11% до 21%. Подальше збільшення кількості каналів зв'язку не призводило до суттєвого підвищення показників надійності мережі.

З аналізу даних табл. 2 та рис. 7 видно, що кількість агрегованих каналів можна обмежити чотирма, а якщо імовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку достатньо високі ($p^j > 0,7$), то взагалі можна обмежитися двома агрегованими каналами. Це обумовлено тим, що подальше збільшення кількості каналів, задіяних у агрегуванні, призводить тільки до зайвих матеріальних витрат без підвищення показників надійності.

Для аналізу диференційованого впливу рівня надійності окремо каналів, які агрегуються, та інших каналів проведено додаткове дослідження. В його межах допускалося, що канали, які не задіяні в агрегуванні (з першого по четвертий), мали однакові ймовірності безвідмовної роботи, тобто $p^1 = p^2 = p^3 = p^4 = p$. Код у середовищі MATLAB для побудови тривимірного графіку залежності імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від значень імовірностей безвідмовної роботи каналів зв'язку мережі та «містка» за наявності чотирьох каналів зв'язку між комутаторами S_2 і S_3 ($n = 4$) представлено на рис. 8. Сам графік наведено на рис. 9. Результати розрахунків наведено у табл. 3.

```
1 [p, p5]=meshgrid(0:0.1:1);
2 q = 1 - p; n=4;
3 Ppath= (1-(1-p5).^n).*(1-q.^2).^2 + ((1-p5).^n).*(1-(1-p.^2).^2);
4 figure;
5 % Перша поверхня Ppath
6 h1 = surf(p, p5, Ppath);
7 hold on;
8 % Задаємо властивості першої поверхні
9 set(h1, 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', [0.25, 0.88, 0.82]);
10 % Додавання контурів
11 contour3(p, p5, Ppath, 30, 'k', 'LineWidth', 1.0);% Контур для Ppath
12 xlabel('_P');
13 ylabel('_P5'), zlabel('P_1_-_4')
14 grid on
15 hold off;
```

Рис. 8. Код у середовищі MATLAB для розрахунків та побудови тривимірного графіку залежності імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від рівня надійності каналів зв'язку за наявності 4-х агрегованих каналів між комутаторами S_2 і S_3

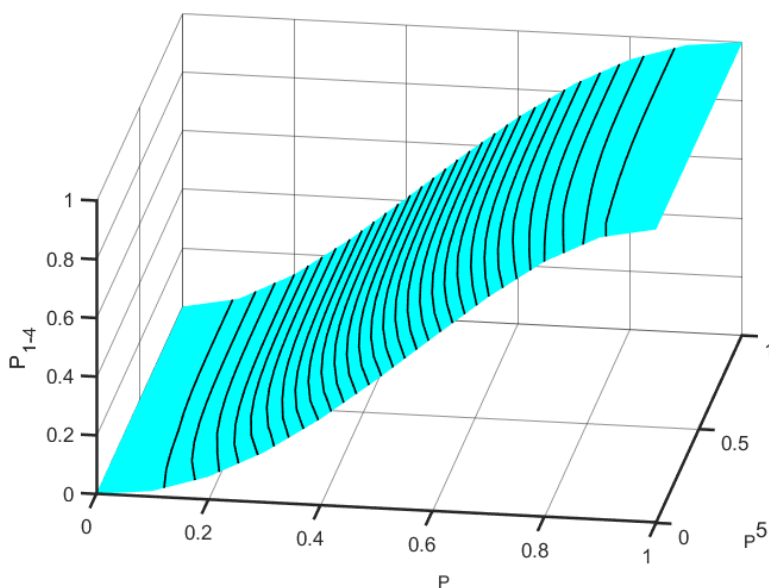


Рис. 9. Залежність імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від співвідношення імовірностей безвідмовної роботи каналів зв'язку за наявності 4-х агрегованих каналів між комутаторами S_2 і S_3

Таблиця 3. Залежність імовірності безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4 від співвідношення імовірностей безвідмовної роботи каналів зв'язку за наявності чотирьох агрегованих каналів зв'язку між комутаторами S_2 і S_3

p/p^5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1	0,0255	0,0960	0,2022	0,3340	0,4804	0,6300	0,7702	0,8880	0,9695
0,2	0,0295	0,1086	0,2240	0,3624	0,5113	0,6584	0,7920	0,9006	0,9735
0,3	0,0322	0,1173	0,2389	0,3819	0,5325	0,6779	0,8069	0,9093	0,9762
0,4	0,0340	0,1230	0,2487	0,3947	0,5463	0,6906	0,8167	0,9149	0,9780
0,5	0,0351	0,1264	0,25459	0,4024	0,5547	0,6984	0,8226	0,9184	0,9791
0,6	0,0357	0,1283	0,2578	0,4067	0,5593	0,7027	0,8259	0,9202	0,9797
0,7	0,0360	0,1292	0,2594	0,4087	0,5615	0,7047	0,8274	0,9211	0,9800
0,8	0,0361	0,1295	0,2600	0,4094	0,5623	0,7054	0,8280	0,9215	0,9801
0,9	0,0361	0,1296	0,2601	0,4096	0,5624	0,7056	0,8281	0,9216	0,9801

Отримані результати свідчать про те, що наявність агрегованих каналів між комутаторами S_2 і S_3 забезпечували помітний вииграш за показниками надійності за умови, коли імовірність безвідмовної роботи каналів зв'язку p^j знаходиться в інтервалі від 0,5 до 0,7. Це пояснюється тим, що якщо канали зв'язку мають високу імовірність безвідмовної роботи (від 0,7 і вище), то вииграш від наявності «містка» – паралельного з'єднання агрегованих каналів, буде незначним, оскільки надійність каналів досить висока. З іншого боку, якщо канали ненадійні (імовірність безвідмовної роботи менше

0,5), то навіть наявність паралельного з'єднання декількох каналів не забезпечить достатнього підвищення показників надійності мережі.

Аналіз рис. 9 і табл. 3 показав, що поверхня (імовірність безвідмовної роботи з'єднання між комутаторами S_1 і S_4) має найбільш вигнутий профіль (стрімкий виграш у надійності) в напрямку збільшення p^5 від 0 до 0,5 якраз, коли показники імовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку знаходяться в інтервалі від 0,5 до 0,7. Далі зростання показників надійності дещо уповільнюється. Тому можна зробити висновок, щодо доцільності використання тієї чи іншої схеми агрегування каналів (портів) для підвищення рівня надійності мережі залежно від надійності окремих каналів.

Висновки

Підвищення надійності сучасних інфокомунікаційних мереж є актуальним науковим і технологічним завданням, розв'язання якого пов'язане із залученням теоретичних і прикладних методів дослідження. Встановлено, що на рівні локальних мереж реалізація механізму агрегування каналів (портів) є дієвим засобом підвищення їхньої продуктивності та надійності. Проте відкритим залишається питання щодо варіантів застосування цього механізму з погляду кількості увімкнених каналів (портів) залежно від стану мережі, тобто рівня надійності її елементів (комутаторів і каналів).

У даній роботі проведено дослідження з метою порівняльного кількісного аналізу рівня надійності локальної мережі, в якій реалізовано механізм агрегування каналів (портів). У результаті дослідження встановлено, що загалом застосування схеми агрегування каналів позитивно впливає на показники надійності мережі. Обґрунтовано умови, за яких найбільш доцільним є використання цієї схеми. Саме коли ймовірності безвідмовної роботи каналів коливались від 0,5 до 0,7, виграш від реалізації схеми складав від 11% до 21% при двох агрегованих каналах. У цих умовах при реалізації схеми агрегування доцільно було обмежитись чотирма каналами. Водночас при $p^j > 0,7$ в схемі агрегування можна було обмежитись взагалі двома каналами. Подальше збільшення агрегованих каналів впливало лише на вартість і продуктивність мережі, але не на показники надійності.

Список літератури

1. Васілевський, О. М., Поджаренко, В. О. (2010), Нормування показників надійності технічних засобів. Вінниця: ВНТУ, 130 с.
2. Журахівський, А. В., Казанський, С. В., Матеєнко, Ю. П., Пастух, О. Р. (2017), Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 456 с.
3. ДСТУ 2861-94 (1994), Державний стандарт України. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Київ: Держстандарт, 16 с.
4. Лемешко, О. В., Поповський, В. В., Лошаков, В. А. та ін., за ред. Поповського В. В. (2010), Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: підручник у 2-х ч. Ч. 1. Харків: ТОВ "Компанія СМІТ", 470 с.

5. Лемешко, О. В., Лошаков, В. А., Поповський, В. В. та ін.; за заг. ред. проф. Поповського В. В. (2010), Багатоканальний електров'язок та телекомунікаційні технології: підручник у 2-х частинах. Ч. 2. Харків: ТОВ "Компанія СМІТ", 482 с.
6. Абрамова, А. О. (2022), Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи системи на основі моделі типу «міцність-навантаження». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 37 с.
7. Бобало, Ю. Я., Волочий, Б. Ю., Лозинський, О. Ю. та ін. (2013), Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 301 с.
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-282-1>.
9. Лемешко, О. В., Єременко, О. С., Євдокименко, М. О., Шаповалова, А. С., Слейман, Б. (2022), Моделювання та оптимізація процесів безпечної та відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах: Монографія. Х.: ХНУРЕ, 198 с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-378-1>.
10. 802.1AX-2020 (2020), IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Link Aggregation, 333 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9105034>.
11. Лемешко, О. В., Єременко, О. С., Євдокименко, М. О., Коваленко, Т. М. (2021), “Методика розрахунку ймовірності компрометації конфіденційних повідомлень при безпечній маршрутизації в інфокомунікаційних мережах з використанням шляхів, які перетинаються”, Проблеми телекомунікацій, No. 2(29). С. 15–27. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2021.2.02>
12. Єременко О.С., Лемешко В.О., Куренко В.О. (2023), “Дослідження показників надійності фрагменту локальної інфокомунікаційної мережі”, Проблеми телекомунікацій, No. 2(33). С. 14–43. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2023.2.02>.