

УДК 004.738

Отрох С.І., к.т.н.; Ярош В.О., аспірант;  
Федюнін С.А., к.т.н.; Власенко В.О., аспірант.

## МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ МАЙБУТНЬОГО

Otroh S.I., Yarosh V.O., Fedyunin S.A., Vlasenko V.O. Calculation methods of reliability of telecommunication networks of the future

Today a significant number of scientific papers are devoted to the development of theoretical and practical aspects of the solution of tasks on increasing the efficiency of functioning of modern telecommunication networks that would be resilient to the unpredictable influence of external destabilizing factors. The questions of increasing of telecommunication networks of the future (FN) reliability by choosing an optimal network topology are considered in the article. Designing reliable telecommunication networks of the future we use mixed or hybrid topologies, which are built on the basis of the standard topologies like "star", "ring", "cell", "each to each", "tree", and the like. Three main methods of calculation of reliability of today's networks telecommunications, namely: the method of sorting states, the method of expansion concerning a particular element, and the method of minimal paths and intersections are described.

**Keywords:** reliability, fault tolerance, method of sorting conditions, the decomposition method relative to a particular element, method of minimal paths and intersections

Отрох С.І., Ярош В.О., Федюнін С.А., Власенко В.О. Методи розрахунку надійності телекомунікаційних мереж майбутнього

В статті розглянуто питання підвищення надійності телекомунікаційних мереж майбутнього за рахунок вибору оптимальної побудови телекомунікаційної мережі. При проектуванні високонадійних телекомунікаційних мереж майбутнього використовуються змішані або гібридні методи побудови на базі стандартних топологій типу "зірка", "кільце", "комірчаста", "кожен з кожним", "деревоподібна" тощо. Наведено три основних методи проведення розрахунків надійності сучасних мереж телекомунікацій.

**Ключові слова:** надійність, відмовостійкість, метод перебору станів, метод розкладу відносного особливого елемента, метод мінімальних шляхів і перетинів

Отрох С.И., Ярош В.А., Федюнин С.А., Власенко В.А. Методы расчета надежности телекоммуникационных сетей будущего

В статье рассмотрены вопросы повышения надежности телекоммуникационных сетей будущего за счет выбора оптимального построения телекоммуникационной сети. При проектировании высоконадежных телекоммуникационных сетей будущего используются смешанные или гибридные методы построения на базе стандартных топологий типа "звезда", "кольцо", "ячеистая", "каждый с каждым", "древовидный" и тому подобное. Приведены три основных метода проведения расчетов надежности современных сетей телекоммуникаций.

**Ключевые слова:** надежность, отказоустойчивость, метод перебора состояний, метод разложения относительно особого элемента, метод минимальных путей и сечений

### Вступ

В даний час значну кількість наукових робіт присвячено розвитку теоретичних і практичних аспектів вирішення завдань підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних мереж (ТКМ) і разом з тим побудови високонадійних і відмовостійких мереж, які були б стійкі до впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів. Міжнародним союзом електрозв'язку ведеться робота з вивчення зовнішніх деструктивних впливів (L.392) на телекомунікаційні мережі [1] та відпрацьовуються рекомендації для підвищення надійності мережі шляхом поліпшення топології, резервування окремих елементів мережі і забезпечення декількох, залежно від важливості, географічних розподілених маршрутів до об'єкта зв'язку і багато інших різних заходів. У зв'язку з цим питання підвищення надійності телекомунікаційної мережі набувають актуальності і особливого значення.

Надійність визначається як властивість об'єкту зберігати в часі у встановлених межах значення усіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в

заданих режимах і умовах застосування [2]. Відмова мережі - це подія, що полягає в порушенні працездатності мережі.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Надійність телекомунікаційних мереж в значній мірі визначається топологією мережі. Вибір топології мережі є однією з основних і найбільш витратних завдань. Для великих територіально розподілених мереж використовуються, як правило, топології змішаного типу, з довільними зв'язками. Як правило питання, пов'язані з набором сервісів мережі, кількістю користувачів мережі, необхідною якістю обслуговування, технологіями, а також географічним положенням вузлів мережі і кількістю зв'язків вирішуються в першу чергу виходячи з економічної доцільності.

Для мереж великої розмірності задачі вибору оптимальної топології мережі, як правило, важко формалізуються через наявність безлічі обмежень, багатокритеріальності, відсутності точних оцінок рішень і необхідних характеристик мережі, а також через відсутність апріорної інформації. Топологія мережі визначається не тільки фізичним розташуванням вузлів мережі, але і характером зв'язків між ними та особливостями передачі інформації по мережі. Характер зв'язків визначає ступінь відмовостійкості мережі, складність мережевої апаратури, метод управління обміном даних, можливі типи каналів зв'язку, довжину ліній зв'язку, кількість абонентів і багато іншого.

Якщо раніше топологія телекомунікаційних мереж майбутнього (future networks) відрізнялася зайвою централізованістю, то в даний час ситуація інша. Постійне зростання навантаження на мережу і вибухоподібне збільшення обсягу переданого трафіку змушує звернути увагу на якість виконання процесу проектування з метою отримання оптимальної топології мережі з врахуванням дотримання нормованих показників якості мережі та її високої стійкості до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Таким чином, саме архітектура і топологія телекомунікаційної мережі визначає якість функціонування і надійність систем зв'язку, що безпосередньо пов'язано зі значним збитком із-за можливої втрати даних або затримки їх отримання. Вибрана топологія мережі, у свою чергу, впливає на склад телекомунікаційного устаткування і програмного забезпечення. При проектуванні високонадійних телекомунікаційних мереж використовуються змішані або гібридні топології, побудовані на базі стандартних топологій типу "зірка", "кільце", "комірчаста", "кожен з кожним", "деревовидна" тощо. Використання топології типу "зірка" забезпечує централізацію потоків даних, що багаторазово спрощує процес управління ними. Істотні недоліки мереж з топологією "зірка": велика витрата кабелю, що значно збільшує інвестиційні витрати і як наслідок вартість мережі, а також можливість перенавантаження центрального вузла мережі. Істотний недолік інших типових топологій, "кільця" і "шини", полягає в тому, що відмова мережевого устаткування будь-якого вузла мережі порушує її роботу в цілому, але і видні очевидні переваги. При впливі на мережу будь-якого дестабілізуючого чинника, який приведе до втрати зв'язку з одним напрямом, трафік піде по іншому маршруту.

З урахуванням усіх вищеперерахованих чинників, узагальнена архітектура сучасної телекомунікаційної мережі буде така, як наведено на рис. 1.

Надійність визначається трьома факторами [3]: середнім часом безвідмовної роботи, середнім часом між збоями MTBF (Mean Time Between Failures) і середнім часом, необхідним для відновлення нормального обслуговування MTRS (Mean Time Restore Service). Зрозуміло, що середній час між збоями MTBF (Mean Time Between Failures) буде складатись із суми середнього часу безвідмовної роботи та середнього часу, необхідного для відновлення нормального обслуговування MTRS (Mean Time Restore Service).

Знаючи MTBF і MTRS можна обчислити коефіцієнт готовності:

$$A = \left(1 - \frac{MTRS}{MTBF}\right) 100\% \quad (1)$$

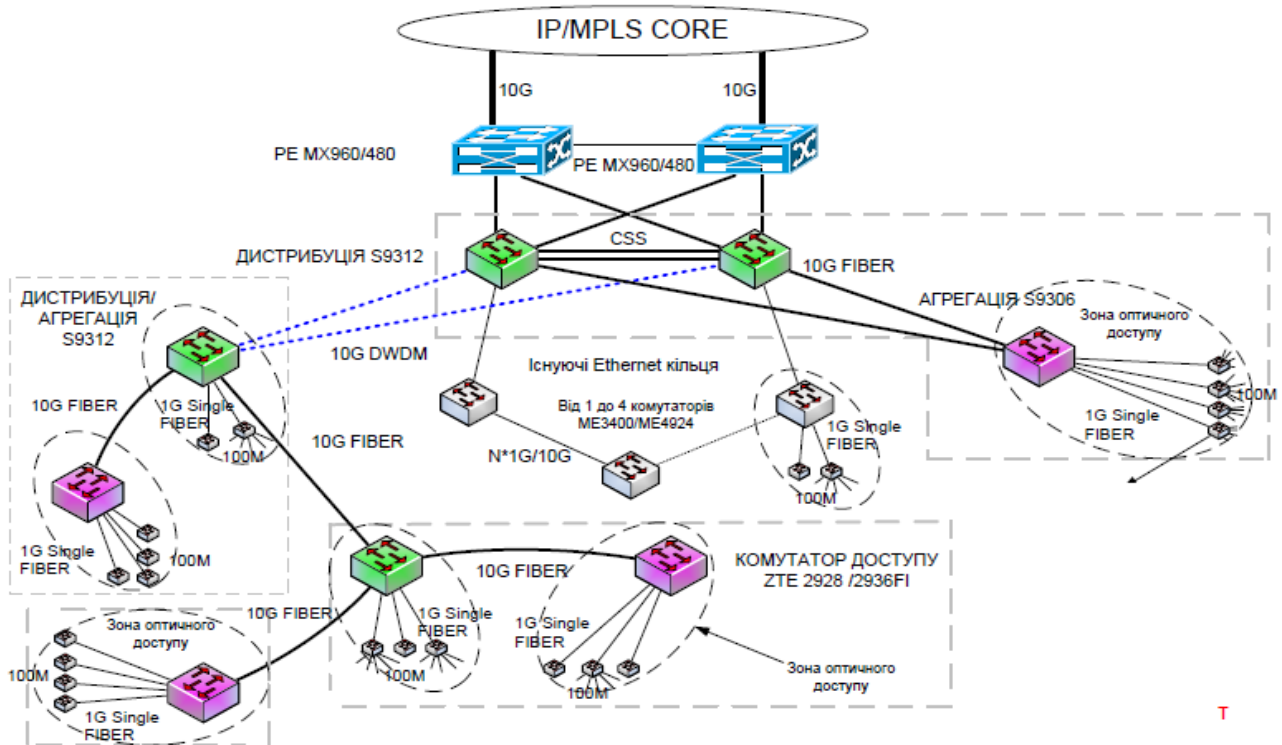


Рис. 1. Узагальнена архітектура телекомунікаційної мережі майбутнього

Розглянемо випадок, коли при розрахунку ймовірності безвідмовної роботи, середнього напрацювання до виникнення першої відмови елементи системи розглядаються як невідновлювальні. В цьому випадку, якщо структура системи зводиться до основного чи резервного з'єднання елементів, при умові, що робота одного з паралельно з'єднаних елементів забезпечують працездатний стан системи, показники безвідмовності останньої визначаються за показниками безвідмовності елементів за використанням класичного методу розрахунку надійності.

Оскільки при основному послідовному з'єднанні елементів працездатний стан системи має місце при співпаданні працездатних станів всіх елементів, то ймовірність цього стану системи визначається виробництвом ймовірностей працездатних станів всіх елементів. Якщо система складається з  $n$  послідовно включених елементів, то при ймовірності безвідмовної роботи кожного з елементів  $p_i(t)$  ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_c(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \quad (2)$$

При паралельному з'єднанні елементів та при умові, що для роботи системи достатньо роботи одного з включених паралельно елементів, відмова системи є спільною подією, яка має місце при відмові всіх паралельно включених елементів. Якщо паралельно включені  $m$  елементів і ймовірність відмови кожного  $q_j(t) = 1 - p_j(t)$ , то ймовірність відмови цієї системи

$$Q_p(t) = q_1(t)q_2(t)\dots q_m(t) = \prod_{j=1}^m q_j(t) \quad (3)$$

Якщо структурна схема надійності системи складається з послідовно і паралельно з'єднаних елементів, то розрахунок її надійності може бути проведений з використанням (2), (3). Так, для системи ймовірність безвідмовної роботи буде:

$$P_c(t) = p_1(t)p_2(t)p_{3456}(t) = p_1(t)p_2(t)\{1 - [1 - p_3(t)p_4(t)][1 - p_5(t)p_6(t)]\} \quad (4)$$

Щоб визначити значення середнього напрацювання системи до відмови та інших показників надійності, потрібно знати закони розподілу часу безвідмовної роботи елементів

(напрацювання до відмови) системи. Оскільки на ділянці нормальної експлуатації з задовольняючою точністю в якості закону розподілу часу безвідмовної роботи елементів може бути прийнятий експоненціальний, то при основному з'єднанні елементів, якщо  $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ , вираз (2) матиме наступний вигляд:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} \dots e^{-\lambda_n t} = e^{-\lambda_c t} \quad (5)$$

де  $\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ .

Таким чином, при основному з'єднанні елементів, що мають експоненціальний закон розподілу часу безвідмовної роботи, закон розподілу часу безвідмовної роботи системи також буде експоненціальним, відповідно до цього маємо:

$$F_c(t) = 1 - e^{-\lambda_c t}; f_c(t) = \lambda_c e^{-\lambda_c t}; \tau_c = \frac{1}{\lambda_c}; \sigma_c = \frac{1}{\lambda_c} \quad (6)$$

При резервному з'єднанні  $m$  елементів, що мають експоненціальний закон розподілу часу безвідмовної роботи, ймовірність відмови групи паралельно включених елементів

$$Q_p(t) = (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_m t}) = \prod_{j=1}^m (1 - e^{-\lambda_j t}) \quad (7)$$

Якщо всі елементи рівнонадійні і  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_m = \lambda_j = \lambda$ , тоді

$$Q_p(t) = (1 - e^{-\lambda t})^m; P_p(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m \quad (8)$$

Таким чином, при резервному поєднанні елементів експоненціальний закон розподілу часу безвідмовної роботи не зберігається.

Розглянутий метод розрахунку широко застосовують для оцінки надійності локальних систем і елементів, що входять в їх склад. На стадії проектування при відомих інтенсивностях відмов елементів оцінюють ймовірність безвідмовної роботи системи і передбачають заходи, направлені на їх підвищення і полягають в резервуванні найменш надійних і найбільш відповідальних елементів, полегшених умов експлуатації, зниження рівня навантаження та ін.

Аналізують надійність зазвичай у декілька етапів. На першому етапі, який проводиться на стадії складання технічного завдання на локальну систему, коли їх структури ще не визначені, проводиться приблизна оцінка надійності. Вона впливає з апріорної інформації про надійність близьких за характером систем та елементів, з допомогою яких вони можуть бути реалізовані. На другому етапі проводиться орієнтовна оцінка надійності. При цьому відомі структура системи та вхідні в її склад елементи, їх показники надійності, задані при нормальних (номінальних) умовах експлуатації.

Кінцевий розрахунок надійності технічних засобів, що іноді називається коефіцієнтним, проводиться на стадії завершення технічного проекту, коли проведена дослідна експлуатація та відомі умови експлуатації всіх елементів. Останні визначаються рівнем навантажень, характером зміни різних величин, як температура навколишнього середовища, рівень вібрації, коливання напруги живлення і частоти, коливання вологості та інше. Облік цих величин дозволяє провести корекцію значення інтенсивності відмов елементів. Так, їх робота при знижених навантаженнях приводить до зниження інтенсивності відмов. Вплив відхилення цих величин на інтенсивність відмов враховують шляхом використання поправкових коефіцієнтів  $k_i$ :

$$\lambda = \lambda_{ном} k_1 k_2 \dots k_n \quad (8)$$

де  $\lambda_{\text{НОМ}}$  – номінальне значення інтенсивності відмов, відповідне нормальним умовам експлуатації;  $k_1, k_2, \dots, k_n$  – поправочні коефіцієнти, враховуючи відхилення впливаючих величин від нормальних значень.

В багатьох випадках розглянутий вище спосіб розрахунку не може бути використаний, так як не завжди схема надійності містить послідовно-паралельне з'єднання елементів.

Топологія сучасної телекомунікаційної мережі в загальному випадку зводиться до декількох рівнів мережі як показано на рис. 2.

Існують декілька різновидів класичного методу розрахунку надійності систем зі складною структурою, частина з яких буде розглянута нижче стосовно до аналізу надійності місткової схеми, зображеної на рис.2. Для всіх елементів схеми відомі ймовірності безвідмовної роботи  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  і відповідні їм ймовірності відмови типу «обрив»  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$ . Необхідно визначити ймовірність наявності ланцюга між точками А і В схеми.

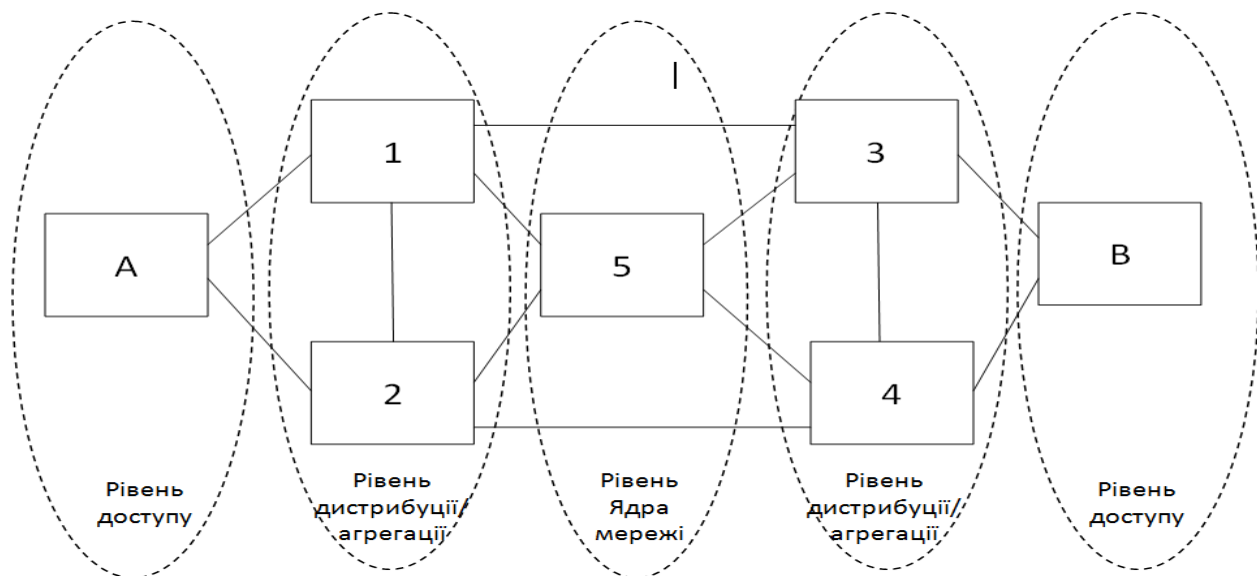


Рис. 2. Топологія сучасної телекомунікаційної мережі

**Метод перебору станів.** Розрахунку надійності будь-якої системи незалежно від використаного методу передуює визначення двох неперетинаючихся множин стану елементів, що відповідають працездатному та непрацездатному стану системи [4]. Кожний з цих станів характеризується набором елементів, що знаходяться в працездатному та непрацездатному станах. Оскільки при незалежних відмовах ймовірність кожного із станів визначається добутком ймовірностей знаходження елементів у відповідних станах, то при числі станів, рівному  $m$ , ймовірність працездатного стану системи

$$P = \sum_{j=1}^m \prod l_j p_l \prod k_j q_k, \quad (9)$$

ймовірність відмови буде:

$$Q = 1 - \sum_{j=1}^m \prod l_j p_l \prod k_j q_k \quad (10)$$

де  $m$  – загальне число працездатних станів, в кожному  $j$ -ому з яких число справних елементів рівне  $l_j$ , а вийшовших з ладу –  $k_j$ .

Розрахунок з використанням методу перебору станів зручно надати у вигляді табл.1, де знаком плюс відмічені працездатні стани, а знаком мінус – непрацездатні. В числовому прикладі всі елементи прийняті рівнонадійними з ймовірністю безвідмовної роботи, рівної 0,9, за заданий час:

$$P = \sum_{j=1}^{16} \prod_{l_j} p_l \prod_{k_j} q_k = p^5 + 5p^4q + 8p^3p^2 + 2p^2q^3 = 0.978 \quad (11)$$

З розглянутого прикладу видно що навіть при порівняльно простій структурі застосування методу перебору стану пов'язано з громіздкими викладками.

Таблиця 1. Розрахунок з використанням методу перебору станів

Номер стану	Стан елементів					Ймовірність станів
	1	2	3	4	5	
1	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 = 0.9^5$ $\left. \begin{array}{l} p_2 p_3 p_4 p_5 q_1 \\ p_1 p_3 p_4 p_5 q_2 \\ p_1 p_2 p_4 p_5 q_3 \\ p_1 p_2 p_3 p_5 q_4 \\ p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 \end{array} \right\} = 0.1 * 0.9^4$ $\left. \begin{array}{l} p_2 p_4 p_5 q_1 q_3 \\ p_2 p_3 p_5 q_1 q_4 \\ p_2 p_3 p_4 q_1 q_5 \\ p_1 p_4 p_5 q_2 q_3 \\ p_1 p_3 p_5 q_2 q_4 \\ p_1 p_3 p_4 q_2 q_5 \\ p_1 p_2 p_4 q_3 q_5 \\ p_1 p_2 p_3 q_4 q_5 \end{array} \right\} = 0.1^2 * 0.9^3$ $\left. \begin{array}{l} p_2 p_4 q_1 q_3 q_5 \\ p_1 p_3 q_2 q_4 q_5 \end{array} \right\} = 0.1^3 * 0.9^2$
2	-	+	+	+	+	
3	+	-	+	+	+	
4	+	+	-	+	+	
5	+	+	+	-	+	
6	+	+	+	+	-	
7	-	+	-	+	+	
8	-	+	+	-	+	
9	-	+	+	+	-	
10	+	-	-	+	+	
11	+	-	+	-	+	
12	+	-	+	+	-	
13	+	+	-	+	-	
14	+	+	+	-	-	
15	-	+	-	+	-	
16	+	-	+	-	-	

**Метод розкладу відносного особливого елементу.** Цей метод заснований на використанні формули повної ймовірності. В складній системі виділяється особливий елемент, всі можливі стани  $H_i$  якого утворюють повну групу,  $\sum_{i=1}^n P\{H_i\} = 1$ . Якщо аналізуючий стан системи А, то його ймовірність

$$P\{A\} = \sum_{i=1}^n P\{H_i\} P\left\{\frac{A}{H_i}\right\} = \sum_{i=1}^n P_i\{A\} \quad (12)$$

Другий співмножник в (12) визначає ймовірність стану А при умові, що особливий елемент знаходиться в стані  $H_i$ . Розгляд  $H_i$  стану особливого моменту як безумовного дозволяє спростити структурну схему надійності і звести її до послідовно-паралельного з'єднання елементів.

Так, в розглядаючій містковій схемі виділення елементу 5 в якості особливого з двома можливими станами (1-наявність і 2-відсутність ланцюга)  $P\{H_1\} = p_5$ ;  $P\{H_2\} = q_5$  дозволяє від структурної схеми перейти при безумовно справному стані елементу 5 до схеми, наданої на рис. 3, а. При відмові елементу 5 структурна схема має вигляд наданий на рис.3 ,б. Якщо стан А – наявність ланцюга між А і В, то відповідно з (2) і (3) маємо:

$$\begin{aligned} P_1\{A\} &= p_5(1 - q_1q_2)(1 - q_3q_4) = 0.882, \\ P_2\{A\} &= q_5[1 - (1 - p_1p_3)(1 - p_2p_4)] = 0.0964, \\ P\{A\} &= P_1\{A\} + P_2\{A\} = p_5(1 - q_1q_2)(1 - q_3q_4) + q_5(p_1p_3 + p_2p_4 - p_1p_2p_3p_4) = 0.978. \end{aligned} \quad (13)$$

Зіставлення обох методів розрахунку надійності показує що виділення особливого елементу з наступним аналізом спрощених структурних схем суттєво скорочує викладки.

Використовуючи формулу повної ймовірності та проводячи послідовне виділення особливих елементів, можна проаналізувати складні системи, що мають перехресні зв'язки. Так, ймовірність безвідмовної роботи двійної місткової схеми (рис. 4)

$$P\{A\} = p_5 \{ p_6 (1 - q_1 q_2) (1 - q_3 q_4) (1 - q_7 q_8) + q_6 (1 - q_1 q_2) (p_3 p_7 + p_4 p_8 - p_3 p_7 p_4 p_8) \} + q_5 \{ p_6 (p_1 p_3 + p_2 p_4 - p_1 p_3 p_2 p_4) (1 - q_7 q_8) + q_6 (p_1 p_3 p_7 + p_2 p_4 p_8 - p_1 p_3 p_7 p_2 p_4 p_8) \}. \quad (14)$$

**Метод мінімальних шляхів і перетинів.** У деяких випадках для аналізу надійності складної системи буває достатнім визначити граничні оцінки надійності зверху і знизу [4].

При оцінці ймовірності безвідмовної роботи зверху визначають мінімальні набори працездатних елементів (шляхів), що забезпечують працездатний стан системи. При формуванні шляху, рахуючи, що всі елементи знаходяться в непрацездатному стані, послідовним переводом елементів в працездатний стан проводять підбір варіантів з'єднання елементів, що забезпечують наявність ланцюга.

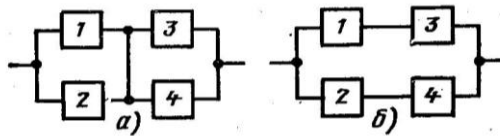


Рис. 3. Структурні схеми місткового з'єднання елементів, відповідних наявності (а) ланцюга в елементі 5 і його відсутності (б)

Набір елементів що утворює мінімальний шлях, якщо виключення будь-якого елементу із набору приводить до відмови шляху. Із цього виходить, що в межах одного шляху елементи знаходяться в основному з'єднанні, а самі шляхи включаються паралельно. Так, для розглянутої місткової схеми мінімальних шляхів представлений на рис. 5. Оскільки один і той самий елемент включається в два паралельні шляхи, то в результаті розрахунку отримуємо оцінку безвідмовності зверху:

$$P_B = 1 - Q_{13} Q_{24} Q_{154} Q_{253} = 1 - (1 - p_2 p_3) (1 - p_2 p_4) (1 - p_1 p_5 p_4) (1 - p_2 p_5 p_3) = 0.997 \quad (15)$$

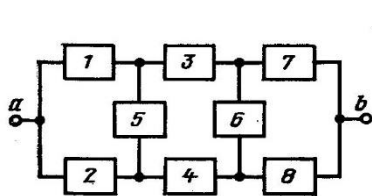


Рис. 4. Подвійна місткова схема з'єднання елементів

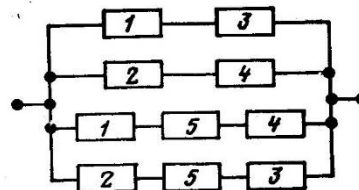


Рис. 5. Набір мінімальних шляхів

При визначенні мінімальних перетинів проводиться підбір мінімального числа елементів, перевід яких із працездатного стану в непрацездатний викликає відмову системи. При правильному підборі елементів перетину повернення будь-якого із елементів в працездатний стан відновлює працездатний стан системи. Оскільки відмова кожного із перетинів викликає відмову системи, то перші з'єднуються послідовно. В межах кожного перетину елементи з'єднуються паралельно, так як для роботи системи достатньо наявності працездатного стану будь-якого із елементів перетину.

Схема мінімальних перетинів для місткової схеми приведена на рис. 6. Так як один і той же елемент включається в два перетини, то отримана оцінка є оцінкою знизу.

$$P_H = p_{12} p_{34} p_{154} p_{253} = (1 - q_1 q_2) (1 - q_3 q_4) (1 - q_1 q_5 q_4) (1 - q_2 q_5 q_3) = 0.978 \quad (16)$$

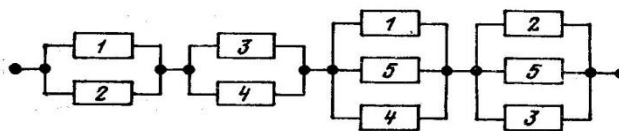


Рис. 6. Набір мінімальних перетинів

В розглянутому прикладі оцінка безвідмовності знизу співпадає з фактичною безвідмовністю, розрахованою по перших двох методах.

Таким чином, при зіставленні мінімальних шляхів і перетинів будь-яка система перетворюється в структуру з паралельно-последовним або последовно-паралельним з'єднанням елементів.

### Висновки

В статті досліджено, що надійність телекомунікаційних мереж майбутнього безпосередньо залежить від оптимального вибору топології мережі. Розглянуто метод розрахунку надійності мережі з последовно-паралельним з'єднанням елементів.

Розраховано надійність ТКМ за допомогою наступних методів: перебору станів, розкладу відносного особливого елемента та мінімальних шляхів і перетинів.

За допомогою цих розрахунків можна побудувати високонадійні мережі майбутнього які будуть стійкими до впливів зовнішніх дестабілізуючих факторів.

### Список використаної літератури

1. Disaster management for improving network resilience and recovery with movable and deployable information and communication technology (ICT) resource units // ITU-T Recommendation L.392. – 2016.

2. ГОСТ 27.003-90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

3. ГОСТ 27.002-89 НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ Основные понятия. Термины и определения. Industrial product dependability. General concepts Terms and definitions.

4. Беркман Л. Н. Операторна модель телекомунікаційної мережі, що комутується та її вплив на розрахунок показників надійності/ Л. Н. Беркман, С. А. Федюнін, С. О. Серих // Збірник «Системи управління, навігації та зв'язку». – 2015. – №4 (36). - С. 18-24.

5. ГОСТ Р 52718-2007 Аппаратура для измерения электрической энергии. Надежность. Часть 21. Сбор данных о надежности счетчиков в условиях эксплуатации.

### Автори статті

**Отрох Сергій Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 091 114 02 49. E-mail: sotrokh@ukrtelecom.ua.

**Ярош Володимир Олександрович** – аспірант, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 093 439 89 32. E-mail: vovayarosh@yandex.ru.

**Федюнін Сергій Анатолійович** – кандидат технічних наук, директор навчально-наукового інституту менеджменту та підприємництва, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 063 121 64 91. E-mail: s.fediunin@gmail.com.

**Власенко Вадим Олександрович** – аспірант, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 063 413 10 18. E-mail: v.vlasenko@dut.edu.ua.

### Authors of the article

**Otroh Serhiy Ivanovych** – candidate of Science (technic), associate professor, associate professor of Department of Telecommunication Systems and networks, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +380 91 114 02 49. E-mail: sotrokh@ukrtelecom.ua

**Yarosh Volodymyr Oleksandrovych** – post-graduate student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +380 93 439 89 32. E-mail: vovayarosh@yandex.ua.

**Fedyunin Serhiy Anatoliyovych** – candidate of Science (technic), Director of Educational and Research Institute of Management and Entrepreneurship, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 063 121 64 91. E-mail: s.fediunin@gmail.com.

**Vlasenko Vadym Oleksandrovych** – post-graduate student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +380 63 413 10 18. E-mail: v.vlasenko@dut.edu.ua.

Дата надходження в редакцію: 08.10.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л.Н. Беркман