

Н. О. Князева, І. В. Колумба

Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ БАЗОВИХ СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖІ НЕВИЗНАЧЕНОЇ ТОПОЛОГІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЇЇ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ

В статті зазначено, що характерними ознаками сучасних мереж є пріоритетне використання бездротового доступу і впровадження в мережу механізмів самоорганізації. При цьому питання оцінки структурної надійності мереж невизначеної топології, в тому числі і самоорганізованих мереж, стають все більш актуальними. Відзначено, що існуючі методи оцінки структурної надійності орієнтовані на застосування для мереж із заздалегідь відомою топологією і в випадках, коли структура мережі постійно змінюється, ці методи виявляються малоприматними. Запропоновано підхід, що передбачає отримання оцінок структурної надійності мереж невизначеною топологією, заснований на урахуванні базових структурних характеристик – розмірності мережі, ступеня її зв'язності, максимально допустимого рангу шляхів (ранг – число гілок (ділянок), що складають шлях), що використовуються для організації зв'язку, який складається в визначенні верхньої і нижньої меж структурної надійності. Верхня межа структурної надійності формується на основі множини шляхів, які можуть використовуватися для організації зв'язків. Нижня межа структурної надійності формується на основі множини розрізів, які поділяють використані шляхи. Множина розрізів визначається на основі отримання двоїстої булевої функції відносно використаних шляхів, представлених в диз'юнктивній нормальній формі. Надано вирази для визначення числа шляхів різних рангів, які можуть бути використані для обслуговування заявок, що надходять в мережу невизначеної топології, а також розрізів, які поділяють шляхи. Представлені вирази, що дозволяють визначити верхню і нижню межі структурної надійності для кожного зв'язку. Надано спосіб отримання середньозваженої оцінки структурної надійності мережі з невизначеною топологією. Виконано приклад реалізації запропонованого способу визначення показника структурної надійності мережі невизначеної топології. Визначено напрямки подальших досліджень.

**Ключові слова:** мережа невизначеної топології, самоорганізовані мережі, структурна надійність, нижня і верхня межа структурної надійності, шлях, розріз.

### Вступ

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних мереж (ТКМ) обумовлює необхідність постійного ускладнення структури мереж і розширення переліку сервісів за рахунок включення нових галузей знань. В останні роки з'являються нові види трафіку і простежується тенденція до збільшення обсягів переданих даних, в першу чергу за рахунок відео і аудіо інформації.

Характерними ознаками сучасних мереж є пріоритетне використання бездротового доступу і впровадження в мережу механізмів самоорганізації. Нові мережі перестають володіти стійкою структурою і перетворюються в так звані самоорганізовані мережі (СМ). Це децентралізовані бездротові мережі, які не мають постійної структури, в яких число вузлів і число зв'язків між вузлами є випадковими в часі величинами, що можуть змінюватися до деякого максимального значення [1]. Будь-який вузол такої мережі може переслати дані, призначені іншим вузлам. При цьому визначення того, якому вузлу переслати дані, проводиться динамічно, на підставі зв'язності мережі в певний момент часу.

Необхідність у використанні нового типу мереж, без визначеної заздалегідь топології і здатної адаптуватися до мінливих характеристик каналів зв'язку, виникла з розвитком всепроникаючих мереж. Перші комерційні самоорганізовані мобільні мережі були розгорнуті в США і Японії в 2009-2010 роках.

Вивченню питань проектування та розвитку СМ присвячений ряд праць (А.С. Кучерявого, О.В. Рослякова, О.І. Пармонова, Є.А. Кучерявого, В.Г. Карташевського, Д.О. Молчанова, С.С. Махрова, Neha Rathi, G. Bianchi та інших). У більшості праць відзначається, що застосування СМ має ряд переваг над бездротовими мережами традиційної (визначеної) топології за рахунок можливості самоконфігурації, самооптимізації і самовідновлення. Такі характеристики СМ дозволяють забезпечувати адаптацію пристроїв мережі при зміні її параметрів (наприклад, кількості користувачів, рівня сигналу, рівня зовнішніх перешкод та ін.); забезпечувати перерозподіл функцій між пристроями при виході з ладу будь-яких вузлів мережі для підвищення її надійності та відмовостійкості [1].

Забезпечення надійності в СМ стає все більш актуальним питанням у зв'язку з інтенсивним розвитком цих мереж в останнє десятиліття.

Під надійністю мережі розуміють її властивість зберігати в часі у встановлених межах значення певних параметрів, що характеризують здатність мережі виконувати необхідні функції в заданих умовах застосування і технічного обслуговування [2]. Оскільки ТКМ відносяться до структурних систем, особливе значення для ТКМ набувають питання оцінки структурної надійності.

Структурний аспект надійності відображає функціонування мережі в залежності від працездатності або відмов вузлів або ліній, магістралей, пучків каналів мережі, тобто він пов'язаний з можливістю

існування в мережі шляхів доставки інформації. Тому, коли говорять про структурну надійність (СН), як правило, мають на увазі надійність шляхів і зв'язків [3-5].

На сьогодні методичний апарат аналізу СН достатньо розроблений: відома безліч методів і моделей оцінки СН мереж. Серед них можна виділити універсальні, придатні для аналізу довільних мережевих структур, і спеціалізовані, що враховують певні особливості мережі і за рахунок цього дозволяють отримати для них більш точні оцінки. Велика частина цих методів розрахована на застосування в задачах аналізу мереж визначеної топології.

Питанням оцінки СН складних систем і мереж присвячені праці В.О. Нетеса, М.М. Єгунова, А.В. Харибіна. Проблеми оцінки структурної надійності ТКМ присвячений ряд робіт Ю.М. Руденко, О. Л. Ненова. Для мереж з визначеною топологією в роботі [3] представлений метод отримання СН, заснований на урахуванні базових структурних характеристик. В роботі [4] розглянута можливість використання структурних характеристик для оцінки СН мережі з невизначеною топологією, наведено метод отримання верхньої і нижньої меж СН для окремого зв'язку в мережі.

### Постановка задачі

Існуючі методи оцінки СН орієнтовані на застосування для мереж із заздалегідь відомою топологією. Однак у випадках, коли структура мережі постійно змінюється, ці методи виявляються малопридатними. У ТКМ невизначеної топології (тим більше, коли мова йде про СМ) невідома множина шляхів, які можуть бути використані для обслуговування кожної заявки. Це ускладнює завдання оцінки СН таких мереж.

У цих умовах більш доцільним є підхід, що передбачає отримання оцінок СН ТКМ на підставі урахування одних лише базових структурних характеристик – розмірності мережі, ступеня її зв'язності, максимально допустимого рангу шляхів (ранг – число гілок (ділянок), що складають шлях), які використовуються для організації зв'язку [3]. Таким чином, виникає задача оцінки СН ТКМ з відомим на певний момент часу числом вузлів і шляхів, але заздалегідь невідомою (невизначеною) топологією.

Структура мережі описується традиційною моделлю графа, що представляє мережу у вигляді множини вузлів (вершин)  $N$ , що моделюють пункти мережі,  $|N| = n$ , і множини гілок (ребер)  $L$ , що моделюють прямі зв'язки, які з'єднують пари вузлів,  $|L| = L$ . Зв'язність між парами вузлів забезпечується шляхами у вигляді послідовностей гілок. Ступінь зв'язності характеризується числом шляхів (в загальному випадку залежних), що реалізують зв'язок між парою вузлів, які тяжіють один до одного. В мережі невизначеної топології саме множина  $L$  не задана, але задається її потужність  $L$ , а надійність всіх гілок ( $P_{xy}$ ) вважається відомою. Вузли мережі вважаються абсолютно надійними. Необхідно визначити значення показника структурної надійності ТКМ невизначеної топології при зміні ступеня її зв'язності

(при видаленні певної кількості гілок).

В роботі [3] представлено, що оцінним показником СН ТКМ може виступати показник СН довільного зв'язку в даній мережі. Зв'язок між парою вузлів, наприклад  $i$  і  $j$ , забезпечується шляхами, отже, для оцінки СН цього зв'язку необхідно в першу чергу визначити кількість незалежних для даного зв'язку шляхів.

Для оцінки структурної надійності мережі в роботі [3] отримано вирази для обчислення числа шляхів деякого рангу і числа шляхів рангу не більше  $R$  для зв'язку з  $i$  в  $j$ .

Число  $m$  шляхів деякого рангу  $r$  ( $r = \overline{1, R}$ ) між вузлами  $i$  і  $j$  визначається як число розміщень з  $(n-2)$  елементів по  $r$  елементів:

$$m_{rij} = A_{n-2}^{r-1}. \quad (1)$$

Тоді число шляхів рангу не більше  $R$ , які реалізують один зв'язок з  $i$  в  $j$ , визначається на основі виразу

$$m_{1\dots R ij} = \sum_{r=1}^R A_{n-2}^{r-1}. \quad (2)$$

Число шляхів певного рангу  $M_r$  у всій повнозв'язаній мережі може бути знайдено за допомогою виразу

$$M_r = \frac{n(n-1)}{2} A_{n-2}^{r-1}. \quad (3)$$

Число шляхів всіх можливих рангів  $M_{1\dots R}$  (від 1 до  $R_{max} = n-1$ ) в повнозв'язній мережі визначається на основі виразу

$$M_{1\dots R} = \frac{n(n-1)}{2} \sum_{r=1}^R A_{n-2}^{r-1}. \quad (4)$$

В повнозв'язній мережі кількість шляхів першого рангу зв'язку з  $i$  в  $j$  дорівнює 1 (пряма гілка). Кількість шляхів рангу вище першого буде різною і залежить від структури мережі. У реальних ТКМ для реалізації одного зв'язку практично не використовуються шляхи максимальних рангів з міркувань ефективності роботи ТКМ. Обмеження зазвичай виконується на рівні третього-четвертого рангу.

Знаючи загальну кількість шляхів  $m_{1\dots R ij}$  і кількість шляхів деякого рангу  $r$  між вузлами  $m_{rij}$ , можна визначити частку шляхів кожного рангу:

$$X_{ij} = \frac{m_{rij}}{m_{1\dots R ij}} = A_{n-2}^{r-1} / \sum_{r=1}^R A_{n-2}^{r-1}, \quad (5)$$

де  $m_{rij}$  – число шляхів деякого рангу  $r$  ( $r = \overline{1, R}$ ) між вузлами  $i$  і  $j$ ;  $m_{1\dots R ij}$  – число шляхів рангу не більше  $R$ , які реалізують один зв'язок між вузлами  $i$  і  $j$ .

У разі, якщо мережа є повнозв'язною і її структура відома і не змінюється, можна вважати, що частка шляхів кожного рангу для окремої пари вузлів буде такою ж як і для інших пар, тобто часткове співвідношення кількості шляхів певних рангів зберігається для всіх пар.

При зміні структури мережі, наприклад, збільшенні або зменшенні кількості пунктів, видаленні окремих гілок, часткове співвідношення кількості шляхів різного рангу змінюється. Так, зі збільшенням кількості пунктів мережі  $n$  збільшується і кількість гілок  $L$ . У цьому випадку кількість шляхів більш високих рангів ( $r > 1$ ) істотно зростає, стає більш вагомим, а кількість прямих зв'язків (ранг  $r = 1$ ) істотно не змінюється. У таких ситуаціях оцінити кількість шляхів кожного рангу при різних значеннях  $n$  і  $L$  і потім отримати часткові співвідношення дозволяє моделювання структури мережі.

Таким чином, частка зв'язків кожного рангу може бути обчислена на основі виразу (5), якщо часткове співвідношення зберігається, в протилежному випадку може бути визначена, наприклад, на основі імітаційного моделювання.

ТКМ стає неповнозв'язною при відсутності однієї або декількох гілок. Для переходу від повнозв'язаної мережі до мережі довільної зв'язності використовуємо співвідношення, що дозволяють знайти загальне число шляхів в мережі при відомому числі гілок мережі. У такому випадку число шляхів рангу  $r$  в мережі з деяким числом пунктів  $n$  і деяким числом гілок  $L$  визначається виразом [3]:

$$M_{r,L} = \frac{n(n-1)}{2} C_{n-2}^{r-1} \cdot \left( 1 - \frac{2m_{r,L \max}}{n(n-1)A_{n-2}^{r-1}} \right), \quad (6)$$

де  $L_{\max} = n(n-1)$  – кількість гілок в повнозв'язній мережі;  $l$  – кількість гілок, відсутніх в мережі (відносно числа гілок в повнозв'язній мережі,  $l = L_{\max} - L$ ).

З виразу (6) можна визначити число шляхів рангу  $r$ , що припадають на один зв'язок ( $i-j$ ), в мережі з  $n$  пунктами і  $L$  гілками (7):

$$m_{(ij)r,L} = \frac{M_{r,L}}{g} = \frac{M_{r,L}}{n(n-1)}, \quad (7)$$

де  $g$  – загальне число зв'язків [3].

Число шляхів рангу не більше  $R$ , які можуть використовуватися для одного зв'язку ( $i-j$ ) –  $M_{ij}$ , – визначається на основі виразу (8):

$$M_{st(1...R)} = \sum_{r=1}^R A_{n-2}^{r-1}. \quad (8)$$

Представлені вирази дозволяють перейти до розрахунку верхньої і нижньої меж СН для зв'язку ( $i-j$ ) в мережі з невизначеною топологією.

Пошук всіх альтернативних шляхів рангу не більше  $R$ , що реалізують зв'язок у напрямку, і розгляд їх в якості незалежних для даного зв'язку, дає верхню межу надійності зв'язку між вузлами. Розрахунок верхньої межі СН  $P_{VMCHij}$  для зв'язку ( $i-j$ ) в мережі з невизначеною топологією згідно [4-5] можна виконати таким чином:

$$P_{VMCHij} = 1 - \prod_{\mu_{ij}^k \in M_{ij}} \left( 1 - \prod_{\beta_{xy} \in \mu_{ij}^k} P_{xy} \right) \quad (9)$$

де  $\beta_{xy}$  – ділянка шляху  $\mu_{ij}^k$ ;  $P_{xy}$  – ймовірність безвідмовної роботи ділянки  $\beta_{xy}$ .

Кількість ділянок шляхів відповідного рангу визначається на основі виразу (7).

Відзначимо, що в отриманій множині шляхів  $M_{ij}$  фіксується не послідовність ділянок  $\beta_{xy}$  шляхів,

а кількість ділянок кожного  $k$ -го шляху  $\mu_{ij}^k \in M_{ij}$  з відповідними значеннями  $P_{xy}$ , які можуть визначатися на основі експертних оцінок або статистичних даних. На етапі моделювання роботи мережі можна скористатися одним з чисельних методів (наприклад, методом Монте-Карло, методом Неймана), які дозволяють отримати значення ймовірностей безвідмовної роботи окремих ділянок зв'язків  $P_{xy}$ .

В основі методу Монте-Карло лежить генерація випадкових чисел, які повинні бути рівномірно розподілені в інтервалі (0; 1) [6]. Якщо потрібно, щоб випадкове число  $x$  знаходилося в інтервалі ( $a$ ;  $b$ ), відмінному від (0; 1), потрібно скористатися виразом для завдання зміщення :

$$x = a + (b - a) \cdot r, \quad (10)$$

де  $r$  – випадкове число з інтервалу (0; 1);  $a$  – початкове значення нового інтервалу;  $b$  – кінцеве значення нового інтервалу.

У реальних системах не застосовуються пристрої з низьким значенням надійності, згідно зі статистичними даними ймовірність безвідмовної роботи зазвичай має значення не нижче 0,9. Виходячи з цього при моделюванні для значень  $P_{xy}$ , що генеруються, слід задати інтервал (0,9; 1).

На основі отриманої кількості шляхів  $M_{ij}$  формується множина розділяючих їх розрізів  $\delta_{ij}$  (наприклад, як двоїста булева функція), причому, як і в разі множини шляхів  $M_{ij}$ , для кожного  $q$ -го розрізу  $\delta_{ij}^q \in \delta_{ij}$  фіксується кількість ділянок  $\beta_{xy}$ , які складають розріз, з відповідними значеннями  $P_{xy}$ . Ці дані дозволяють виконати розрахунок нижньої межі СН  $P_{HMCHij}$  окремого зв'язку  $i-j$  в мережі з невизначеною топологією [3, 4]:

$$P_{HMCHij} = 1 - \prod_{\delta_{ij}^q \in \delta_{ij}} \left( 1 - \prod_{\beta_{xy} \in \delta_{ij}^q} P_{xy} \right), \quad (11)$$

де  $\delta_{ij}$  – множина розділяючих розрізів,  $\beta_{xy}$  – кількість ділянок, що становлять розріз, з відповідними значеннями  $P_{xy}$ .

Використовуючи розраховані верхню (9) і нижню (11) межі СН, можна перейти до визначення оцінки СН окремого зв'язку ( $i-j$ ) в мережі – для всіх пар ( $i-j$ ), що тяжіють, виконується розрахунок показника СН як середньозваженої величини значень  $P_{VMCHij}$  і  $P_{HMCHij}$ .

$$P_{ПСНij} = P_{VMCHij} \cdot k_B + P_{HMCHij} \cdot k_H, \quad (12)$$

де  $k_B$  и  $k_H$  – вагові нормовані характеристики ( $k_B + k_H = 1$ ), що визначають важливість (значимість) для знаходження показників  $P_{VMCHij}$  і  $P_{HMCHij}$ , відповідно. Значення даних коефіцієнтів доцільно визначати на основі експертного аналізу.

На основі (12) представимо спосіб визначення оцінки СН всієї мережі. Показник СН для мережі

визначається як середньозважене значення за показниками всіх зв'язків (пар, що тяжіють)  $(i-j)$ :

$$P_{ПСНij} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{СНij} w_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}, \quad (13)$$

де  $w_{ij}$  – вагові характеристики окремих зв'язків, які визначають пріоритет кожного зв'язку. Значення коефіцієнтів  $w_{ij}$  ненормовані і можуть бути представлені в балах, наприклад, за 10 або 100-бальною системою оцінки.

Виконаємо приклад розрахунку показника СН для довільного зв'язку  $(i-j)$  за умови, що інтерес для розрахунку представляють шляхи, ранг яких не більше трьох. Нехай на основі виразів (2) і (4) отримане наступне число шляхів множини  $M_{ij}$ : 1 шлях рангу 1; 2 шляхи рангу 2; 4 шляхи рангу 3.

Запишемо множини шляхів  $M_{ij}$  в диз'юнктивній нормальній формі (ДНФ):

$$M_{ij} = x_1 + x_2x_3 + x_4x_5 + x_6x_7x_8 + x_9x_{10}x_{11} + x_{12}x_{13}x_{14} + x_{15}x_{16}x_{17}. \quad (14)$$

Тут  $x_z$  – позначення гілок, що утворюють дані шляхи з  $i$  в  $j$ . Відзначимо, що відповідно до наведених в даному прикладі позначень, всі шляхи вважаються незалежними, хоча в загальному випадку шляхи можуть бути пересічними.

Будемо вважати відомими ймовірності  $P_z$  безвідмовної роботи ділянок  $x_z$  мережі:

$$\begin{aligned} P_1 = P_3 = P_5 = P_7 = 0,98; \\ P_2 = P_4 = P_6 = P_8 = 0,99; \\ P_9 = P_{11} = P_{13} = P_{15} = 0,985; \\ P_{10} = P_{12} = P_{14} = P_{16} = P_{17} = 0,995. \end{aligned}$$

Тоді верхня межа СН  $P_{ВМСНij}$  визначається відповідно до виразу (9) таким чином:

$$\begin{aligned} P_{ВМСНij} = 1 - (1 - p_1) \cdot ((1 - p_2 p_3)) \cdot (1 - p_4 p_5) \times \\ \times (1 - p_6 p_7 p_8) \cdot (1 - p_9 p_{10} p_{11}) \times \\ \times (1 - p_{12} p_{13} p_{14}) \cdot (1 - p_{15} p_{16} p_{17}). \end{aligned} \quad (15)$$

Використовуючи задані значення ймовірностей  $P_z$  безвідмовної роботи ділянок  $x_z$  мережі, отримаємо:

$$\begin{aligned} P_{ВМСНij} = 1 - (1 - 0,98)(1 - 0,99 \times 0,98) \times \\ \times (1 - 0,99 \times 0,98)(1 - 0,99 \times 0,98 \times 0,99) \times \\ \times (1 - 0,985 \times 0,995 \times 0,985) \cdot (1 - 0,995 \times 0,985 \times 0,995) \times \\ \times (1 - 0,985 \times 0,995 \times 0,995) = 0,99999999985. \end{aligned}$$

Для отримання значення нижньої межі СН  $P_{НМСНij}$  слід на основі множини шляхів  $M_{ij}$  отримати множини розділяючих розрізів  $\delta_{ij}$ . Для цього для функції (14), представленій в ДНФ, отримаємо двоїсту булеву функцію в кон'юнктивній нормальній формі (КНФ):

$$\begin{aligned} \delta_{ij} = x_1(x_2 + x_3)(x_4 + x_5)(x_6 + x_7 + x_8) \times \\ \times (x_9 + x_{10} + x_{11})(x_{12} + x_{13} + x_{14}) \times (x_{15} + x_{16} + x_{17}). \end{aligned} \quad (16)$$

Виконавши перетворення КНФ в ДНФ, отримаємо множини розрізів (17):

$$\begin{aligned} \delta_{ij} = x_1x_2x_4x_6x_9x_{12}x_{15} + x_1x_3x_4x_6x_9x_{12}x_{15} + \\ + \dots + x_{13}x_5x_8x_{11}x_{14}x_{17}. \end{aligned} \quad (17)$$

Відповідно до (11) отримаємо вираз для розрахунку  $P_{НМСНij}$  (18):

$$\begin{aligned} P_{НМСНij} = (1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_4)(1 - p_6) \times \\ \times (1 - p_9)(1 - p_{12})(1 - p_{15})) \cdot (1 - (1 - p_1)(1 - p_3) \times \\ \times (1 - p_4)(1 - p_6)(1 - p_9)(1 - p_{12})(1 - p_{15})) \times \dots \quad (18) \\ \dots \times (1 - (1 - p_1)(1 - p_3)(1 - p_5)(1 - p_8) \times \\ \times (1 - p_{11})(1 - p_{14})(1 - p_{17})). \end{aligned}$$

Використовуючи задані значення ймовірностей  $P_z$  безвідмовної роботи ділянок  $x_z$  мережі, отримаємо:

$$\begin{aligned} P_{НМСНij} = (1 - (1 - 0,98)(1 - 0,99)(1 - 0,99) \times \\ \times (1 - 0,99)(1 - 0,985)(1 - 0,995)(1 - 0,985)) \times \\ \times (1 - (1 - 0,98)(1 - 0,98)(1 - 0,99)(1 - 0,99) \times \\ \times (1 - 0,985)(1 - 0,995)(1 - 0,985)) \times \dots \times \\ \times (1 - (1 - 0,98)(1 - 0,98)(1 - 0,98)(1 - 0,99) \times \\ \times (1 - 0,985)(1 - 0,995)(1 - 0,995)) = \\ = 0,999999999775. \end{aligned}$$

На основі виразу (12) для прийнятих значень  $k_B = 0,4$  і  $k_H = 0,6$  визначається значення показника  $P_{ПСНij}$  для зв'язку  $(i-j)$ :

$$\begin{aligned} P_{ПСНij} = P_{ВМСНij} \cdot 0,4 + P_{НМСНij} \cdot 0,6 = \\ = 0,99999999985 \cdot 0,4 + 0,999999999775 \cdot 0,6 = \\ = 0,999999999805. \end{aligned}$$

Після виконання розрахунків для всіх зв'язків  $(i-j)$  на основі виразу (13) з урахуванням значень  $w_{ij}$  (вагових коефіцієнтів зв'язків  $(i-j)$ ) визначається значення показника СН ТКМ з невизначеною топологією.

## Висновки

У даній роботі запропоновано спосіб оцінки структурної надійності мереж з невизначеною топологією на основі показника структурної надійності ТКМ  $P_{ПСН}$ , що визначається з використанням нижньої (НМСН) і верхньої (ВМСН) меж структурної надійності. Представлені вирази для визначення числа шляхів різних рангів, які можуть бути використані для обслуговування заявок, що надходять в мережу невизначеної топології, а також розрізів, які поділяють шляхи. На основі визначених верхньої і нижньої меж структурної надійності окремих зв'язків представлений підхід до розрахунку середньозваженої оцінки структурної надійності всієї мережі з невизначеною топологією.

Виконано приклад реалізації запропонованого способу визначення показника структурної надійності мережі невизначеної топології.

Вирішення питань визначення значень ймовірностей  $P_z$  безвідмовної роботи ділянок  $x_z$  мережі, значень  $k_B$  і  $k_H$  (вагових коефіцієнтів, визначаючих важливість, значимість для визначення показників  $P_{ВМСНij}$  і  $P_{НМСНij}$ , відповідно), а також значень  $w_{ij}$  (ва-

гових коефіцієнтів зв'язків ( $i-j$ )), представляє самостійну наукову задачу. У подальших дослідженнях передбачається розробка підходів щодо вирішення зазначених завдань.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерявий А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявий Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. — 312 с.
2. Нетес В. А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN. *Вестник связи*. № 1, 2007. С. 126–130.
3. Князева Н. О., Ненов О. Л. Оцінка структурної надійності телекомунікаційної мережі. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. № 688. Комп'ютерні системи та мережі. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. С. 129–137.
4. Князева Н. А., Ненов А. Л. Метод оценки структурной надежности сети при изменении ее структуры. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2011. Т. 9, № 4. С. 318–325.
5. Ненов А. Л. Оценка структурной надежности сети связи на основе учета её структурных характеристик. *Вісник ДУИКТ*. 2013. № 2. С. 33–39.
6. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. Москва: Физматлит, 1973. 312 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. В. Вишневський,  
Державний університет телекомунікацій, Київ  
Received (Надійшла) 22.10.2018  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 05.12.2018

### Использование базовых структурных характеристик сети неопределенной топологии для оценки ее структурной надежности

Н. А. Князева, И. В. Колумба

В статье показано, что характерными признаками современных сетей являются приоритетное использование беспроводного доступа и внедрение в сеть механизмов самоорганизации. При этом вопросы оценки структурной надежности сетей неопределенной топологии, в том числе и самоорганизующихся сетей, становятся все более актуальными. Отмечено, что существующие методы оценки структурной надежности ориентированы на применение для сетей с заранее известной топологией и в случаях, когда структура сети постоянно изменяется, эти методы оказываются малоприменимыми. Предложен подход, предполагающий получение оценок структурной надежности сетей неопределенной топологии, основанный на учете базовых структурных характеристик – размерности сети, степени ее связности, максимального допустимого ранга путей (ранг – число ветвей (участков), составляющих путь), используемых для организации связи, состоящий в определении верхней и нижней границ структурной надежности. Верхняя граница структурной надежности формируется на основе множества путей, которые могут использоваться для организации связей. Нижняя граница структурной надежности формируется на основе множества сечений, разделяющих используемые пути. Множество сечений определяется на основе получения двойственной булевой функции относительно множества используемых путей, представленных в дизъюнктивной нормальной форме. Представлены выражения для определения числа путей различных рангов, которые могут быть использованы для обслуживания заявок, поступающих в сеть неопределенной топологии, а также сечений, разделяющих пути. Представлены выражения, позволяющие определить верхнюю и нижнюю границы структурной надежности для каждой связи. Представлен способ получения средневзвешенной оценки структурной надежности сети с неопределенной топологией. Выполнен пример реализации предложенного способа определения показателя структурной надежности сети неопределенной топологии. Определены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** сеть неопределенной топологии, самоорганизующаяся сеть, структурная надежность, нижняя и верхняя граница структурной надежности, путь, сечение.

### The use of the basic structural characteristics of the network of uncertain topology to assess its structural reliability

N. Kniazieva, I. Kolumba

The article presents that the characteristic features of modern networks are the priority use of wireless access and the introduction of self-organization mechanisms into the network. At the same time, the issues of assessing the structural reliability of networks of uncertain topology, including self-organizing networks, are becoming increasingly relevant. It is noted that the existing methods for assessing structural reliability are focused on applications for networks with a previously known topology and in cases where the structure of the network is constantly changing, these methods are of little use. An approach is proposed that assumes obtaining estimates of the structural reliability of networks of uncertain topology based on taking into account the basic structural characteristics — the network dimensions, the degree of its connectivity, the maximum allowable path rank (rank — the number of branches (sections) that make up the path) used for networks; determining the upper and lower limits of structural reliability. The upper limit of structural reliability is formed on the basis of a variety of paths that can be used to organize connections. The lower limit of structural reliability is formed on the basis of a set of sections that separate the paths used. The set of sections is determined on the basis of obtaining a dual Boolean function relative to the set of paths used, represented in disjunctive normal form. Expressions are presented for determining the number of paths of various ranks that can be used to serve applications coming into the network of uncertain topology, as well as sections that separate paths. Expressions are presented that allow determining the upper and lower limits of structural reliability for each bond. A method for obtaining a weighted average of the structural reliability of a network with an uncertain topology is presented. An example of the implementation of the proposed method for determining the index of structural reliability of a network of uncertain topology has been performed. Directions for further research are identified.

**Keywords:** network of uncertain topology, self-organizing network, structural reliability, lower and upper boundaries of structural reliability, path, section.