

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

© Князєва Н.О., 2012

Показано актуальність питань аналізу та оцінки живучості телекомунікаційних мереж на підставі використання потокового підходу. Запропоновано ефективний обчислювальний алгоритм формування матриць максимальних міжполюсних потоків та мінімальних розрізів. Подано метод підвищення живучості мережі, сформульовано задачу реконфігурації мережі як задачу лінійного програмування.

Ключові слова: живучість, телекомунікаційна мережа, максимальний потік, розріз, реконфігурація, показник.

The relevance of the analysis and evaluation of telecommunication networks' survivability based on the use of streaming approach is shown. An effective computational algorithm of matrix interpolator maximum flows and minimum cuts. The method of increasing the network survivability is present, network reconfiguration problem is formulated as a linear programming problem.

Key words: survivability, telecommunications network, the maximum flow, incision, reconfiguration, indicator.

Постановка проблеми, аналіз досліджень та публікацій

Живучість належить до найважливіших характеристик телекомунікаційних мереж (ТКМ) у зв'язку з їхнім інтенсивним розвитком в останнє десятиліття. Під живучістю розуміють здатність ТКМ зберігати і відновлювати виконання основних функцій у заданому обсязі й протягом заданого часу у випадку зміни структури мережі й умов її функціонування внаслідок деяких зовнішніх несприятливих впливів (ЗНВ) [1, 2]. Крім того, під живучістю будь-якої системи розуміють її здатність продовжувати функціонування і забезпечувати виконання основних функцій за заданих показників якості обслуговування [3].

Живучість ТКМ аналізують і оцінюють на різних рівнях проектування, моделювання і функціонування, використовуючи різні методи аналізу й оцінки. Так, у роботі [1] представлені методи оцінки живучості – функціональної і структурної, основані на застосуванні теоретико-ігрового, ентропійного підходів, логіко-імовірнісних моделей. У роботі [4] описано методи обчислення загальної живучості мережевої інформаційної системи в поліноміальній формі, а також методи, основані на використанні штучного інтелекту; запропоновані моделі й алгоритми для розв'язання задач аналізу й оцінки живучості мереж. У роботі [3] наведено детерміновані і стохастичні моделі невідновлюваних та відновлюваних систем, які дають змогу досліджувати процеси зміни властивості живучості в часі й умовах, що безперервно або дискретно змінюються; наведено методи оцінки живучості різних систем – асоціативних, структурних, асоціативно-структурних. Автори зазначених робіт ([1– 4]) внесли вагомий внесок у розвиток теорії живучості систем різного призначення і методології оцінки живучості. Зазначимо, що розглянуті загальні проблеми оцінки і підвищення живучості, що стосуються систем різного призначення, заторкують і ТКМ. Водночас сучасні тенденції розвитку телекомунікацій, процеси конвергенції мереж, перехід до мереж нового покоління – NGN, FGN – зумовлюють актуальність питань оцінки і підвищення живучості сучасних телекомунікаційних мереж з урахуванням тенденцій їхнього розвитку. При цьому особливого значення набувають питання забезпечення структурної живучості мереж у зв'язку з процесами їхньої конвергенції. Структурна живучість розглядається як можливості реконструкції, реорганізації, реконфігурації при ЗНВ, які дадуть змогу створити структуру, що забезпечує функціонування мережі.

У математичній теорії графів показники структурної живучості інтерпретуються як кількісні міри зв'язності для структури графа: мінімальний розріз, вузлова зв'язність, узагальнена зв'язність, довжина шляху тощо, тобто задачі оцінки структурної живучості мережі можна звести до задач аналізу зв'язності графів, оцінки імовірності формування працездатної структури у випадку несприятливих впливів тощо [1]. Під час розв'язання зазначених задач виникає необхідність у визначенні кількості шляхів, які залишаються в мережі при ЗНВ, що виражається у видаленні деякої лінії зв'язку (гілки) з мережі.

У роботі [5] наведено оцінку імовірності виключення деякого заданого шляху при видаленні деякої довільної гілки. Отримано вираз для кількості шляхів рангу r , що залишаються після видалення з повнозв'язної мережі l гілок (у мережі залишається $L = L_{\max} - l$ гілок):

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

де $m_{r,L_{\max}}$ – кількість шляхів рангу r , що припадають на один зв'язок $i-j$, у мережі з n вузлами і L_{\max} гілками (L_{\max} – максимально можлива кількість гілок мережі).

Кількість шляхів рангу r , що припадають на один зв'язок $i-j$, у мережі з n вузлами і L гілками, визначається за формулою:

$$m_{(ij)r,L} = \frac{M_{r,L}}{g} = \frac{M_{r,L}}{n(n-1)}, \quad (2)$$

де g – загальна кількість пар, що тяжіють.

Імовірність безвідмовного функціонування зв'язку довільної пари $i-j$, що тяжіє, яка характеризує структурну надійність усієї мережі, розраховують за формулою:

$$P_{(ij)} = 1 - \prod_{r=1}^R (1 - P_{xy}^r)^{m_{(ij)r,L}}, \quad (3)$$

де p_{xy} – імовірність безвідмовної роботи гілки між довільними вузлами x і y . Використавши вирази (2) і (3), можна визначити основні характеристики живучості телекомунікаційної мережі – K -зв'язність графа (мережі), діаметр графа (мережі) тощо.

Водночас відзначається [наприклад, 4], що потоковий підхід до визначення живучості є ефективнішим, ніж підхід, оснований на оцінці кількості шляхів, що залишаються в мережі після видалення деякої гілки (гілок) з мережі.

Під час проектування ТКМ задача аналізу структурної живучості може формулюватися як задача оцінки величини максимального потоку, що передається в мережі у разі відмов її елементів і зниження до допустимого рівня якості функціонування. При цьому виникає задача визначення того, які максимальні потоки зміняться у разі видалення деякої гілки з мережі і як при цьому зміняться показники структурної живучості. Крім того, безумовний інтерес викликає задача визначення можливості реконфігурації ТКМ із метою забезпечення необхідних показників структурної живучості.

Формулювання мети статті

Метою цієї роботи є розроблення методу підвищення структурної живучості телекомунікаційної мережі на підставі реконфігурації мережі, що здійснюється на основі запропонованих показників структурної живучості.

Виклад основного матеріалу

У цій роботі запропонований ефективний обчислювальний алгоритм, який на основі використання процедури двійкового кодування розрізів [6] дає змогу сформулювати не тільки матрицю максимальних міжполюсних потоків V , але також і матрицю CS кодів розрізів, кожен елемент якої cs_{st} представляє двійковий код мінімального розрізу, що визначає величину максимального потоку ϑ_{st} – відповідного елемента матриці V . Будь-який розріз в орієнтованому графі представляється n -розрядним двійковим кодом, у неорієнтованому – $(n-1)$ -розрядним двійковим кодом. Оскільки коди, що містять всі нулі або всі одиниці, не є розрізами, в орієнтованому графі може бути $(2^n - 2)$ розрізів, у неорієнтованому – $(2^{n-1} - 1)$ розрізів (n – кількість вершин графа).

Дві підмножини вершин графа, утворених розрізом, інтерпретуються як підмножини джерел (s) і стоків (t). Першій з підмножин ставляться у відповідність одиничні символи в коді розрізу, другій – нульові (можна прийняти і навпаки). Перелік ребер, що входять у будь-який розріз, одержують з матриці пропускних здатностей ребер (ліній мережі) C і коду цього розрізу. Очевидно, якщо рядкам матриці C надати змісту джерел, а стовпцям – зміст стоків, то в розріз, що заданий деяким двійковим кодом, входять ребра, що визначаються елементами матриці, розміщеними на перетинаннях рядків і стовпців, відповідних цьому коду. А саме – номери рядків визначаються за номерами двійкових розрядів коду розрізу, у яких записана “1”, а номери стовпців визначаються за номерами двійкових розрядів коду розрізу, у яких записаний “0”.

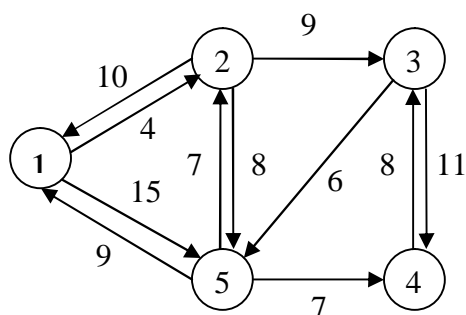
Розрізу, що розділяє, наприклад, вершини 1, 2, 5 і 3, 4, відповідають рядки 1, 2, 5 і стовпці 3 і 4 матриці C , на перетинанні яких розташовані елементи $c_{13}, c_{14}, c_{23}, c_{24}, c_{53}, c_{54}$, що визначають набір ребер, які входять у зазначений розріз. Якщо $c(x, y) > 0$, це означає, що ребро (x, y) існує й входить в розріз; якщо ж $c(x, y) = 0$, це означає, що ребро (x, y) відсутнє, тобто не може входити в розріз. Обчислення значення пропускну здатності розрізу зводиться до підсумовування значень $c(x, y)$ ребер, що входять у розріз.

Розглянемо як приклад орієнтований граф, зображений на рис. 1, матриця пропускних здатностей ребер графа подана в табл. 1.

У наведеному прикладі величина пропускну здатності розрізу S , що розділяє вершини 1, 2, 5 від вершин 3, 4, становить:

$$C(S) = c_{13} + c_{14} + c_{23} + c_{24} + c_{53} + c_{54} = 0 + 0 + 9 + 0 + 0 + 7 = 16 \text{ од.}$$

Таблиця 1



$$C = \begin{bmatrix} \infty & 4 & 0 & 0 & 9 \\ 10 & \infty & 9 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & \infty & 11 & 6 \\ 0 & 0 & 8 & \infty & 0 \\ 15 & 7 & 0 & 7 & \infty \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Орієнтований граф

Розглянутий алгоритм дає змогу одночасно з обчисленням величин усіх розрізів визначити максимальні потоки між всіма парами вершин графа. Алгоритм ґрунтується на тому, що індекси всіх елементів матриці $c(x, y)$, розміщені на перетинаннях рядків і стовпців, відповідних коду розрізу, збігаються не тільки з індексами всіх ребер (x, y) , що входять у розріз, а й з індексами всіх міжполюсних потоків ϑ_{st} , що поділяються цим розрізом.

Розглянемо суть алгоритму [6, 7].

У процесі роботи алгоритму формується матриця V міжполюсних максимальних потоків. Приймають, що вихідні значення елементів матриці V дорівнюють “ ∞ ”. Утворюється двійковий код розрізу $KR(S)$ і обчислюється пропускна здатність $C(S)$ (величина) чергового розрізу S як сума пропускних здатностей ребер, розміщених на перетинаннях рядків і стовпців, відповідних коду розрізу. Величина кожного потоку ϑ_{st} , поділюваного цим розрізом, порівнюється з обчисленою пропускну здатністю розрізу й замінюється останньою за умови:

$$C(S) < \vartheta_{st}, \quad (4)$$

де ϑ_{st} – величина потоку, яка була визначена на попередніх кроках алгоритму (відповідно до попередніх розрізів). Крім того, якщо нерівність (4) виконується, елементу c_{st} матриці CS присвоюється значення відповідного коду розрізу, а саме: $c_{st} = KR(S)$.

Процес обчислень повторюється для всіх розрізів.

У результаті роботи алгоритму формується матриця V , кожний елемент якої ϑ_{st} визначає величину максимального потоку між вершинами s і t , а також матриця CS кодів розрізів, кожний елемент якої cs_{st} визначає двійковий код мінімального розрізу $KR(S)$ щодо максимального потоку ϑ_{st} .

Для графа, що наведений на рис.1, матриця максимальних міжполюсних потоків і матриця кодів мінімальних розрізів подані в табл. 2 і 3, відповідно.

Таблиця 2

$$V = \begin{bmatrix} \infty & 11 & 13 & 13 & 13 \\ 24 & \infty & 16 & 16 & 23 \\ 6 & 6 & \infty & 17 & 6 \\ 6 & 6 & 8 & \infty & 6 \\ 22 & 11 & 16 & 16 & \infty \end{bmatrix}$$

Таблиця 3

$$CS = \begin{bmatrix} - & 11101 & 00001 & 00001 & 00001 \\ 01110 & - & 10011 & 10011 & 01111 \\ 01100 & 01100 & - & 00100 & 01100 \\ 01100 & 01100 & 01000 & - & 01100 \\ 11100 & 11101 & 10011 & 10011 & - \end{bmatrix}$$

Так, наприклад, максимальний потік $J_{42} = 6$ од., код відповідного мінімального розрізу – 01100. Розріз утворюють ребра (3, 1), (3, 2), (3, 5), (4, 1), (4, 2), (4, 5) (в табл. 3 нумерація розрядів коду і відповідно – номерів вершин графа – здійснена справа зліво). Величина розрізу 01100 становить:

$$C(01100) = c_{31} + c_{32} + c_{35} + c_{41} + c_{42} + c_{45} = 0 + 0 + 6 + 0 + 0 + 0 = 6 \text{ од.}$$

Максимальний потік $J_{54} = 16$ од., код відповідного мінімального розрізу – 10011. Розріз утворюють ребра (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (5, 3), (5, 4). Величина розрізу 10011 дорівнює:

$$C(10011) = c_{13} + c_{14} + c_{23} + c_{24} + c_{53} + c_{54} = 0 + 0 + 9 + 0 + 0 + 7 = 16 \text{ од.}$$

тощо.

Матриці V і CS містять усю необхідну інформацію, яка застосовуватиметься при ЗНВ. Розглянемо ситуацію – ЗНВ, у результаті якого деяка гілка мережі β_{pl} вийде з ладу. Застосування матриці CS дає можливість одержати необхідну інформацію щодо того, які максимальні потоки ϑ_{st} змінять свої величини у разі видалення гілки β_{pl} з мережі. Якщо номерів p у коді розрізу відповідає “1”, а номеру l відповідає “0”, у матриці CS здійснюється пошук кодів розрізів з відповідним станом розрядів коду: для p – “1”, для l – “0”. Знайдені елементи cs_{st} матриці CS і визначають ті максимальні потоки ϑ_{st} , значення яких у результаті видалення гілки β_{pl} зменшаться на величину пропускну здатності цієї гілки c_{pl} .

Запропонований у цій роботі метод підвищення живучості ТКМ оснований на визначенні допустимості зміни показників структурної живучості мережі в результаті ЗНВ, що виражається у видаленні деякої гілки β_{pl} з мережі й розв’язання задачі реконфігурації мережі як задачі лінійного програмування.

Як показник структурної живучості ТКМ використовується середня величина максимального потоку за всіма чинними вимогами на передачу інформації (потоків у мережі). Кожен потік належить відповідному класу k ($k = \overline{1, K}$, K – кількість класів потоків). Кожному класу присвоюють пріоритет відповідно до заданого показника якості обслуговування QoS потоків цього класу. Для кожного потоку (або для потоків відповідного класу) задається їх “вага”, яка визначає значущість потоку (або класу потоків). Задається допустима відносна зміна показника структурної живучості для усієї мережі $\Delta \bar{V}_{\max}^{\text{доп}}$, яка визначається на основі допустимої зміни необхідної якості, а також допустима відносна зміна величини максимальних потоків для відповідних класів потоків $-\Delta_{st(k)}^{pr}$.

Метод полягає у виконанні таких дій.

1. Визначення матриці максимальних міжполюсних потоків V і матриці CS кодів розрізів, кожен елемент яких J_{st} і cs_{st} представляє величину максимального потоку і двійковий код мінімального розрізу, що поділяє, відповідно.

2. Визначення за матрицею CS , у які розрізи cs_{st} входить гілка β_{pl} і на яку величину змінилися відповідні максимальні потоки.

3. На основі урахування “ваги” потоків (або “ваги” класів потоків) – розрахунок середньозваженої величини максимального потоку в мережі до ЗНВ – \bar{V}_{\max} і після ЗНВ – $\bar{V}_{\max}^{\text{ЗНВ}}$.

4. Визначення відносної зміни показника структурної живучості мережі:

$$\Delta \bar{V}_{\max \text{cp}}^{\text{ЗНВ}} = \frac{\bar{V}_{\max \text{cp}} - \bar{V}_{\max \text{cp}}^{\text{ЗНВ}}}{\bar{V}_{\max \text{cp}}}$$

і порівняння отриманого значення із заданою допустимою зміною, визначеною на основі заданої якості обслуговування:

$$\Delta \bar{V}_{\max \text{cp}}^{\text{прип}} > \Delta \bar{V}_{\max \text{cp}}^{\text{ЗНВ}} \quad (5)$$

5. Якщо не виконується умова (5), переходять до п. 6, інакше ніяких дій не починати – ЗНВ істотно не вплинуло на живучість мережі.

6. Визначення (у послідовності, що відповідає пріоритетам pr потоків) максимальних міжполюсних потоків, величини яких змінилися в результаті ЗНВ. Порівняння максимальної величини відносної зміни потоків (відповідно до пріоритетів) із заданою допустимою зміною для максимальних потоків відповідного класу (пріоритету) $pr - \Delta'_{st(k)}$:

$$\max_{(s,t)} \Delta V_{st \max}^{\text{ЗНВ}} < \Delta'_{st(k)} \quad (6)$$

7. Формування переліку вимог на реконфігурацію мережі на підставі переліку потоків, для яких умова (6) не виконується. Величина потоків J_{st}^{TP} , які треба розподілити у реконфігурованій мережі, визначається як:

$$J_{st}^{\text{TP}} = J_{st}^{\text{ЗНВ}} + \Delta'_{st}{}^{pr},$$

де $J_{st}^{\text{ЗНВ}}$ – величина потоку після ЗНВ, $\Delta'_{st}{}^{pr}$ – те значення, що забезпечує необхідну величину J_{st}^{TP} потоку відповідного класу (пріоритету) pr .

8. Побудова матриці допустимих шляхів для усіх потоків J_{st}^{TP} . У виборі шляхів варто виходити з того, щоб гілки β_{ij} , що утворюють множину шляхів $m = [\mu_i]$ розподілення кожного потоку J_{st}^{TP} визначеного класу (пріоритету), не включалися, за змогою, в шляхи розподілення більш пріоритетних потоків (у матриці допустимих шляхів для шляхів усіх потоків застосовується наскрізна нумерація, i – номер шляху).

9. Формулювання задачі реконфігурації мережі як задачі лінійного програмування.

Максимізувати зважену цільову функцію, що характеризує пропускну здатність мережі:

$$F = \sum_{i=1}^I C_i f_i \rightarrow \max,$$

де i – номер шляху; I – кількість шляхів матриці допустимих шляхів для усіх потоків J_{st}^{TP} ; C_i – пропускну здатність i -го шляху; f_i – вага i -го шляху, що визначається відповідно до його рангу r_i (ранг – кількість гілок, що утворюють шлях):

$$f_i = K \frac{r_{\max}}{r_i},$$

де r_{\max} – максимальний ранг серед шляхів матриці допустимих шляхів, K – коефіцієнт, який задається так, щоб усі f_i були цілочисловими, при лінійних обмеженнях (7), (8), зв'язаних з величинами вимог на розподілення потоків і величинами пропускну здатностей гілок мережі, використовуваних у шляхах створеної матриці допустимих шляхів:

1) Сумарна пропускну здатність c_{st}^v усіх шляхів, використовуваних для розподілення потоку J_{st}^{TP} , повинна, за можливості, дорівнювати величині цього потоку:

$$\sum_{v=1}^{N(s,t)} c_{st}^v \leq J_{st}^{\text{TP}} (s, t = \overline{1, n}), \quad (7)$$

де $N(s, t)$ – кількість використовуваних шляхів μ_{st}^v для розподілення потоку J_{st}^{TP} ; c_{st}^v – пропускну здатність шляху μ_{st}^v .

2) Сумарна пропускна здатність шляхів усіх потоків, що проходять по гілці β_{xy} , не повинна перевищувати гранично допустимої пропускної здатності c_{xy} цієї гілки:

$$\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \sum_{v=1}^{N(s,t)} c_{st}^v \leq c_{xy} (x, y = \overline{1, n}, m_{st}^v \in b_{xy}) \quad (8)$$

10. Реконфігурація мережі – формування нової структури з урахуванням отриманих у результаті розв’язання задачі трас прямих каналів для розподілення потоків.

11. Для реконфігурованої мережі (ркфм) – розрахунок середньозваженої величини максимального потоку в мережі $\overline{\Delta V}_{\max \text{ ср}}^{\text{ркфм}}$.

12. Визначення відносної зміни показника структурної живучості реконфігурованої мережі:

$$\overline{\Delta V}_{\max \text{ ср}}^{\text{ркфм}} = \frac{\overline{V}_{\max \text{ ср}} - \overline{V}_{\max \text{ ср}}^{\text{ркфм}}}{\overline{V}_{\max \text{ ср}}}$$

13. Визначення показника живучості реконфігурованої мережі за умовою (9):

$$\overline{V}_{\max \text{ ср}}^{\text{прип}} > \overline{\Delta V}_{\max \text{ ср}}^{\text{ркфм}} \quad (9)$$

Якщо умова (9) виконується, то рішення про забезпечення необхідних показників живучості мережі отримано. У протилежному випадку можливі такі рекомендації:

- збільшення пропускних здатностей визначених гілок на обчислену в результаті розв’язання задачі величину;
- зміна пріоритетів визначених вимог;
- обмеження величини вимог, що надходять у мережу;
- зміна задаваних гранично допустимих значень показників структурної живучості для мережі загалом;
- зміна задаваних гранично допустимих значень показників якості обслуговування окремих потоків (класів потоків).

Висновок

Застосування цього методу дає змогу реалізувати можливості мережі з реконфігурації, що забезпечує необхідну якість обслуговування QoS потоків відповідного класу, а також виробити відповідні рекомендації щодо чинних вимог і обмежень – допустимих значень показників структурної живучості для мережі загалом і допустимих значень показників якості обслуговування окремих потоків (класів потоків).

1. Додонов А.Г., Ландэ Д.В. *Живучесть информационных систем*. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
2. Стекольников Ю.И. *Живучесть систем* – СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.
3. Зайченко Ю.П., Мохаммадреза Моссавари. *Анализ показателей живучести компьютерной сети с технологией MPLS* // Вісник Національного технічного університету “КПІ”. Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – Вип. 43. – 2005. – С. 73-80.
4. Синтез и анализ живучести сетевых систем : монография / Ю.Ю. Громов, В.О. Драчев, К.А. Набатов, О.Г. Иванова. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 152 с.
5. Князева Н.А., Ненов А.Л. *Метод оценки структурной надежности сети при изменении ее структуры* // Вісник ДУИКТ. Т.9. – 2011. – № 4. – С. 318–325.
6. Кутасин Б.П., Яцук Л.Е. *Некоторые вопросы применения ЭВМ для управления сетью святы* // Труды ОЭИС им. А.С.Попова. – Вып. 18. – Одесса: Изд ОЭИС, 1969. – С. 3–12.
7. Князева Н. А. *Алгоритмы оценки структурной живучести инфокоммуникационной сети* // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології. VIII наук.- техн. конф.: збірник тез. – К.: 2012. – С. 192–193.