

УДК 621.395.7

Комарова Л. О., канд. фіз.-мат. наук, с.н.с. (Тел.: +380 44 249 25 39. E-mail: lacosta_k@ukr.net)
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

Шматко В. С., інженер (Тел.: +380 (63) 304 06 30. E-mail: kkz@ukr.net)
(Державний заклад «Київський коледж зв'язку»)

ОПТИМАЛЬНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ВУЗЛІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Комарова Л. О., Шматко В. С. Оптимальне резервування комутаційних вузлів телекомунікаційної мережі. Розглянуто задачу оптимального резервування комутаційних вузлів телекомунікаційної мережі за умов обмежень на результуючі затрати на мережні ресурси. Для подолання "прокляття розмірності" при розв'язанні задач оптимального управління надійністю телекомунікаційних мереж як великих і складних систем використано метод динамічного програмування. Показано, що застосований метод досить легко формалізується та алгоритмізується. Наведено чисельний приклад розрахунку оптимального резерву для типового сегменту телекомунікаційної мережі.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, комутаційний вузол, складна система, резервування, управління надійністю, прокляття розмірності, динамічне програмування

Комарова Л. А., Шматко В. С. Оптимальное резервирование коммутационных узлов телекоммуникационной сети. Рассмотрена задача оптимального резервирования коммутационных узлов телекоммуникационной сети при условиях ограничений на результирующие затраты на сетевые ресурсы. Для преодоления "проклятия размерности" при решении задач оптимального управления надежностью телекоммуникационных сетей как больших и сложных систем использован метод динамического программирования. Показано, что примененный метод достаточно легко формализуется и может быть реализован в виде алгоритма для дальнейшего программирования на ЭВМ. Приведен численный пример расчета оптимального резерва для типового сегмента телекоммуникационной сети.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, коммутационный узел, сложная система, резервирование, управление надежностью, проклятие размерности, динамическое программирование

Постановка задачі. Задачі резервування та відновлення у телекомунікаційних мережах при перевантаженні або фізичній відмові мережного комутаційного вузла часто розглядаються в аспекті перенаправлення трафіку [1...3] на раніше запланований резервний маршрут або пошуку нового маршруту. Але розв'язання задач резервування саме мережних вузлів з метою підвищення їх структурної надійності потребує інших підходів, заснованих на теорії ймовірностей, дослідження операцій та теорії надійності [4].

Формулювання задачі оптимального резервування мережного обладнання. Розглянемо задачу визначення оптимального числа резервних мережних вузлів з урахуванням обмежуючих факторів (результуючих витрат). Під витратами будемо розуміти масу, габарити, вартість, енергоспоживання, додатковий ресурс каналу передачі тощо.

У телекомунікаційній мережі, стійкій до відмов, існує рахункова множина параметрів $\mathbf{Y} = \{y_i\}$, $i = \overline{1, N}$, від яких залежить результуюча надійність системи. Це, у першу чергу, кількість резервних елементів та топологія резервованої мережі. Під топологією резервованої мережі ми розуміємо номери резервованих елементів та кратність резервування. Крім того, до параметрів надійності слід віднести параметри систем контролю та діагностики, характеристики центральної обчислювальної системи та вбудованих периферійних обчислювачів тощо. Враховуючи інтенсивне впровадження обчислювальних потужностей до мережного обладнання, можна покласти частину завдань управління надійністю саме на периферійні процесори обробки даних.

Сформулюємо задачу оптимального резервування мережних вузлів та елементів як задачу визначення потрібної кількості M_{rs} резервних пристроїв, при якому забезпечується задане значення показника $\Psi(\mathbf{Y})$ надійності мережі при мінімальних витратах:

$$M_{rs}(\mathbf{Y}) \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, N}, \\ \Psi(y_i) \in L$$

де L – вектор обмежень на складові показника надійності $\Psi(\mathbf{Y})$.

Нехай телекомунікаційна мережа складається з сегментів, які у рамках завдань управління надійністю можна вважати автономними. У свою чергу, автономний сегмент (АС) складається з n_s мережних вузлів, кожний з котрих має m_j , $j = \overline{1, n_s}$ резервних пристроїв. Позначимо імовірність безвідмовної роботи кожного вузла через p_j , $j = \overline{1, n_s}$. Якщо вважати, що відмова будь-якого мережного вузла призводить до відмови мережі у цілому, тоді імовірність безвідмовної роботи мережі виражається так:

$$P_M = \prod_{j=1}^{n_s} [1 - (1 - p_j)^{m_j}].$$

Якщо імовірність відмови мережного вузла $q_j = 1 - p_j$ є величиною другого порядку малості у порівнянні з p_j , тобто $q_j = 1 - p_j \ll 1$, $q_j \ll p_j$, то імовірність відмови мережі в цілому визначається як

$$Q_M \approx \sum_{j=1}^{n_s} q_j^{m_j}, \quad M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_s}\}, \quad (1)$$

де $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_s}\}$ – множина резервних елементів.

Загальні витрати на резервування системи виражаються у вигляді лінійної функції:

$$C_M = \sum_{j=1}^{n_s} c_j m_j, \quad (2)$$

де c_j – витрати на резервування j -го вузла.

Чисельний метод оптимального резервування мережного обладнання. Для пошуку оптимального числа резервних мережних вузлів з урахуванням обмежуючих факторів теоретично можна використати класичний метод множників Лагранжа [5]. Але для складних систем більш прийнятними є чисельні методи [6].

З багатьох чисельних методів прийнятним та таким, що досить легко формалізується, є метод динамічного програмування [7]. На відміну від методів прямого або покоординатного пошуку [8], при використанні методу динамічного програмування є можливість значного скорочення варіантів перебору при пошуку найкращого варіанту. Для цього вводиться так звана домінуюча послідовність – підмножина варіантів, що є найбільш перспективними для пошуку оптимального варіанту.

Розглянемо загальну множину варіантів рішення як сукупність точок у координатах "вартість – імовірність відмови." На Рис.1 зображено приклад такої сукупності точок.

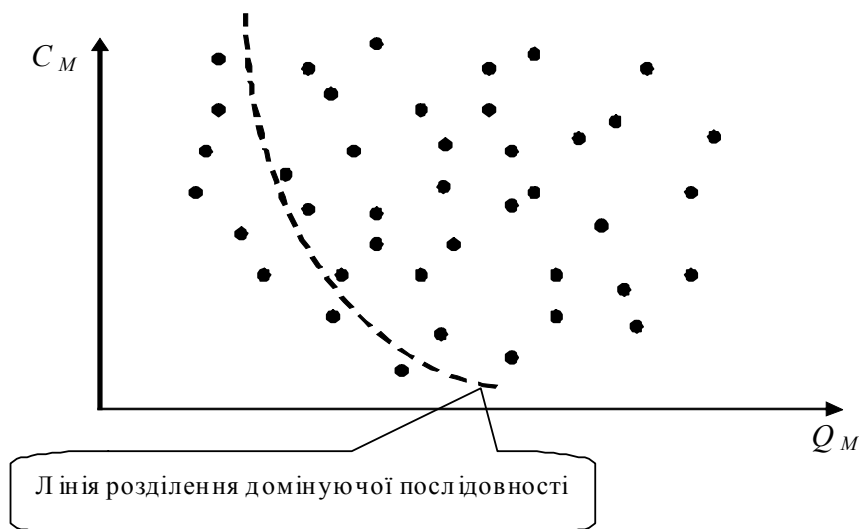


Рис. 1. Сукупність варіантів рішення з відокремленням домінуючої послідовності

З усіх варіантів витрат C_M , які менш ніж задані, прийнятними є варіанти, яким відповідає мінімальна імовірність відмови Q_M . Аналогічно, з усіх варіантів з заданою або меншою, ніж задана, імовірністю відмови, прийнятними є варіанти з мінімальними витратами. Тому з усієї безлічі варіантів доцільно вибрати для аналізу підмножину точок, які зосереджені унизу та зліва (див. Рис. 1). Очевидно, кількість "перспективних" варіантів набагато менша, ніж загальна їх кількість. Тому треба проводити порівняльний аналіз тільки тих варіантів, які знаходяться у домінуючій послідовності.

Теоретично множина припустимих варіантів (домінуюча послідовність) представляє багатовимірну матрицю виду $\mathbf{R} = [r_{j_1, j_2, \dots, j_k, \dots, j_{ns}}]$ з елементами $[r_{j_1, j_2, \dots, j_k, \dots, j_{ns}}]$, де $j_k, k = \overline{1, ns}$ – індекс рядка, стовпця, шару, об'єму і т.д. На практиці, звичайно, треба обмежувати розмірність даної матриці, щоб запобігти попаданню у "пастку розмірності" [9, 10].

У даній конкретній задачі застосування підходу на основі динамічного програмування для послідовного пониження розмірності є вельми придатним, тому що процедура досить просто формалізується та алгоритмізується. Покажемо це на чисельному прикладі.

Стосовно задачі оптимального резервування логічно вважати, що деякий набір, що представляє комбінацію резервних елементів, є більш прийнятним, ніж інший набір, якщо для одного й того ж припустимого рівня надійності встановлення цього набору у складі мережного сегменту пов'язано з меншими витратами. Інші набори, відповідно, виключаються з аналізу.

Розглянемо процедуру розрахунку оптимального складу резервованого мережного сегменту за такими початковими даними.

У сегменті телекомунікаційної мережі є три комутаційних вузла. Треба розрахувати схему оптимального резервування шляхом уведення "гарячого" резерву до будь-якого вузла за умов, імовірність відмови сегменту за період $[0, T]$ не повинна перевищувати

$$Q_3(T) \leq 3 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

при мінімальних витратах. Вихідні дані:

$$Q_{31}(T) = 10^{-5}, C_{31} = 0,3; \quad Q_{32}(T) = 10^{-6}, C_{32} = 0,2; \quad Q_{33}(T) = 10^{-6}, C_{33} = 0,1.$$

Максимальне число резервних вузлів $M = 2$.

1. Спочатку розглянемо частину мережного сегменту, до складу якого входять перший та другий вузли та обчислимо надійність та витрати на побудову цієї частини для різних варіантів резервування.

Матриця домінуючої послідовності для даної задачі має вигляд

$$\mathbf{R} = [r_{m1, m2}], \quad m1, m2 = \overline{0, 2}; \quad m1 + m2 \leq 2,$$

де $r_{m1, m2} = [Q_{res}, C_{res} |_{m1, j, m2, j}], \quad j = \overline{1, 2}; \quad Q_{res}$ – результуюча імовірність відмови;

C_{res} – витрати при різних варіантах резервування.

Оскільки за умовами задачі максимальне число резервних вузлів не перевищує двох одиниць, можливі такі варіанти резервування та відповідні їм імовірності відмов та витрати:

1) $\mathbf{R}[0, 0]$ – резервування відсутнє:

$$\mathbf{R}[0, 0] \rightarrow \begin{cases} C_{00res} = C_{31} + C_{32} = 0,3 + 0,2 = 0,5 \\ Q_{00res} = Q_{31} + Q_{32} = 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-5} \end{cases}; \quad (4)$$

2) $\mathbf{R}[1, 0]$ – однократне резервування тільки першого вузла:

$$\mathbf{R}[1, 0] \rightarrow \begin{cases} C_{10res} = 2C_{31} + C_{32} = 0,6 + 0,2 = 0,8 \\ Q_{10res} = Q_{31}^2 + Q_{32} = 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-6} \approx 2 \cdot 10^{-6} \end{cases}; \quad (5)$$

3) $\mathbf{R}[2,0]$ – двократне резервування тільки першого вузла:

$$\mathbf{R}[2,0] \rightarrow \begin{cases} C_{20\text{res}} = 3C_{31} + C_{32} = 0,9 + 0,2 = 1,1 \\ Q_{10\text{res}} = Q_{31}^3 + Q_{32} = 10^{-15} + 2 \cdot 10^{-6} \approx 2 \cdot 10^{-6} \end{cases}; \quad (6)$$

4) $\mathbf{R}[0,1]$ – однократне резервування тільки другого вузла:

$$\mathbf{R}[0,1] \rightarrow \begin{cases} C_{01\text{res}} = C_{31} + 2C_{32} = 0,3 + 0,4 = 0,7 \\ Q_{01\text{res}} = Q_{31} + Q_{32}^2 = 10^{-5} + 4 \cdot 10^{-12} \approx 10^{-5} \end{cases}; \quad (7)$$

5) $\mathbf{R}[0,2]$ – двократне резервування тільки другого вузла:

$$\mathbf{R}[0,2] \rightarrow \begin{cases} C_{02\text{res}} = C_{31} + 3C_{32} = 0,3 + 0,6 = 0,9 \\ Q_{02\text{res}} = Q_{31} + Q_{32}^3 = 10^{-5} + 8 \cdot 10^{-18} \approx 10^{-5} \end{cases}; \quad (8)$$

6) $\mathbf{R}[1,1]$ – однократне резервування першого та другого вузла:

$$\mathbf{R}[1,1] \rightarrow \begin{cases} C_{11\text{res}} = 2C_{31} + 2C_{32} = 0,6 + 0,4 = 1,0 \\ Q_{11\text{res}} = Q_{31}^2 + Q_{32}^2 = 10^{-10} + 4 \cdot 10^{-12} = 1,04 \cdot 10^{-10} \end{cases}. \quad (9)$$

Порівнюючи результати розрахунків за формулами (4)...(9), робимо однозначний висновок, що тільки варіанти за формулами (5), (6) та (9) задовольняють обмеженням (3) при заданих початкових даних.

2. Тепер додамо до першого та другого вузлів послідовно під'єднаний третій комутаційний вузол та розглянемо варіанти нової домінуючої послідовності

$$\mathbf{R}_{\text{res}} = [r_{m1,m2,m3}], \quad m1, m2, m3 = \overline{0,2}; \quad m1 + m2 + m3 \leq 2.$$

З урахуванням обмеження на загальну кількість резервних елементів, поставимо у відповідність попереднім варіантам (5), (6), (9) припустимі варіанти загальних домінуючих послідовностей:

$$\mathbf{R}[1,0] \rightarrow \mathbf{R}_{\text{res}}[1,0,1]; \quad \mathbf{R}[2,0] \rightarrow \mathbf{R}_{\text{res}}[2,0,1]; \quad \mathbf{R}[1,1] \rightarrow \mathbf{R}_{\text{res}}[1,1,0].$$

Вибравши ці послідовності, додамо до них значення витрат C_{res} та Q_{res} при з'єднанні трьох комутаційних вузлів (КУ):

$$\mathbf{R}_{\text{res}}[1,0,1] \rightarrow \begin{cases} C_{\text{res}} = 2C_{31} + C_{32} + 2C_{33} = 0,6 + 0,2 + 0,2 = 1,0; \\ Q_{\text{res}} = Q_{31}^2 + Q_{32} + Q_{33}^2 = 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-6} + 10^{-12} \approx 2 \cdot 10^{-6}. \end{cases} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{\text{res}}[2,0,0] \rightarrow \begin{cases} C_{\text{res}} = 3C_{31} + C_{32} + C_{33} = 0,9 + 0,2 + 0,1 = 1,2; \\ Q_{\text{res}} = Q_{31}^3 + Q_{32} + Q_{33} = 10^{-15} + 2 \cdot 10^{-6} + 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-6}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{\text{res}}[1,1,0] \rightarrow \begin{cases} C_{\text{res}} = 2C_{31} + 2C_{32} + C_{33} = 0,6 + 0,4 + 0,1 = 1,1; \\ Q_{\text{res}} = Q_{31}^2 + Q_{32}^2 + Q_{33} = 10^{-10} + 4 \cdot 10^{-12} + 10^{-6} \approx 10^{-6}. \end{cases} \quad (12)$$

За імовірністю відмови практично всі варіанти задовольняють поставленому обмеженню (3), однак за витратами на резервування найбільш придатним є варіант (10). Іншими словами, найбільш доцільно зробити однократний резерв для першого та третього комутаційних вузлів.

Схему мережного сегменту, резервованого за варіантом (10), зображено на Рис. 2. Фігурні стрілки означають векторний характер даних.

У варіанті "гарячого" резерву потік мережного трафіку, що поступає на резервовані вузли, може розділятися на дві частини, які обробляються паралельно в основному та резервному вузлах. Завдяки цьому можна очікувати зменшення затримок обробки в комутаційних вузлах та, відповідно, зниження витрат загального мережного ресурсу.

Треба відмітити, що ці міркування мають якісний характер і потребують подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

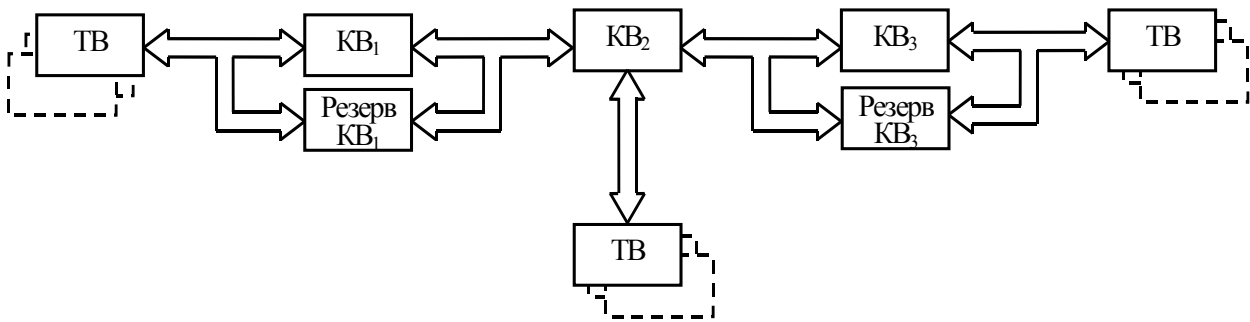


Рис. 2. Схема мережного сегменту з оптимальним резервуванням
 ТВ – термінальні вузли; $KB_i, i=1,2,3$ – мережні (комутаційні) вузли

Висновки. Розроблено метод пошуку оптимального числа резервних мережних вузлів з урахуванням обмежуючих факторів. Теоретичною засадою методу є динамічне програмування з виділенням та подальшим аналізом домінуючих послідовностей. Завдяки цьому вдається уникнути так званого "прокляття розмірності" та скоротити обчислювальне навантаження та Метод досить легко формалізується та алгоритмізується.

У подальших дослідженнях в цьому напрямі необхідно провести порівняльний аналіз ефективності застосування "гарячого" та "холодного" резервування за критеріями затрат мережного ресурсу та підтримки необхідного рівня надійності мережі.

Література

1. Егунов В. П. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях / В. П. Егунов, М. М. Шувалов // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 2. – С. 3-10.
2. Бугров Д. А. Методы поэтапной структурной оптимизации магистральных корпоративных сетей : автореферат на соискание учёной степени кандидата технических наук / Д. А. Бугров. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет, 2007. – 10 с.
3. Величко В. В. Телекоммуникационные системы и сети / В. В. Величко, Е. А. Субботин, В. П. Шувалов, А. Ф. Ярославцев ; под ред. В. П. Шувалова. Том 3. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2005. – 711 с.
4. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
5. Янг Л. Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления / Л. Янг. – Москва : Мир, 1974. – 488 с.
6. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – Москва : Наука, 1981. – 488 с.
7. Беллман Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел. – Москва : Мир, 1974. – 207 с.
8. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ : практическое руководство / Т. Шуп ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1982. – 238 с.
9. Radovanovic M. Hubs in Space: Popular Nearest Neighbors in High-Dimensional Data [Електронний ресурс] / М. Radovanovic, А. Nanopoulos, М. Ivanovic // Journal of Machine Learning Research. – 2010. – Vol. 11. – P.2487-2531. – Режим доступа: <http://www.jmlr.org/>
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин ; пер. с англ. – 2-е изд., испр. – Москва : ООО "И.Д. Вильямс", 2006. – 1104 с.

Дата надходження в редакцію: 24.12.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М. М. Климаш