

УДК 681.324

Бондаренко В. Є., канд. техн. наук (Тел.: +380 (99) 520 62 19. E-mail: victorbondarenko@ukr.net)
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

ОПТИМІЗАЦІЯ ЖИВУЧОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Бондаренко В. Є. Оптимізація живучості телекомунікаційних мереж. В роботі пропонується нова модель синтезу живучої телекомунікаційної мережі, яка складається з ієрархічних і кільцевих елементарних структур з врахуванням вартості забезпечення живучості. Розроблена модель вкладається в рамки задач нелінійного булевого програмування. Модель має два критерії – максимізація живучості (суб'єктивної ймовірності функціонування мережі при деструктивних впливах) і мінімізація вартості обладнання мережі. Для спрощення реалізації моделі ці два критерії об'єднані у один.

Ключові слова: живучість, моделювання, телекомунікаційна мережа, нелінійне булеве програмування

Бондаренко В. Е. Оптимизация живучести телекоммуникационных сетей. В работе предлагается новая модель синтеза живучей иерархической телекоммуникационной сети, которая состоит с иерархических и кольцевых элементарных структур с учетом стоимости обеспечения живучести. Разработанная модель вкладывается в рамки задачи нелинейного булевого программирования. Модель имеет два критерия – максимизация живучести (субъективной вероятности функционирования сети при деструктивных воздействиях) и минимизация стоимости оборудования сети. Для упрощения реализации модели, эти два критерия объединены в один.

Ключевые слова: живучесть, моделирование, компьютерные сети, нелинейное булево программирование

Вступ. В першому десятиріччі XXI сторіччя телефонна мережа загального користування, мережа мобільного зв'язку, мережа документального електрозв'язку почали зближуватися з утворенням конвергентного інформаційного середовища. Це зближення приводить до об'єднання цих мереж і утворення єдиної мережі нового покоління NGN (Next Generation Network) [1..3], яка швидко впроваджується в телекомунікаційну інфраструктуру, поступово перетворюючись на базову технологію побудови мереж зв'язку. При відповідній апаратній підтримці, мережі з пакетною комутацією, використовуючи сучасні технології ATM, SDH, MPLS, IP-MPLS, PON, WiMAX та ін., можливо реалізувати концепцію єдиного, конвергентного середовища передачі мультимедійного трафіку – цифрових даних, голосової телефонії, телебачення і т. п.

Слід відзначити, що телекомунікаційна мережа весь час зазнає деструктивних впливів соціально-фізичного середовища, в якому вона функціонує [4]. Тому актуально стоїть проблема розробки живучих телекомунікаційних мереж, які здатні протидіяти таким впливам, зберігаючи свою працездатність.

Крім того, при проектуванні живучої телекомунікаційної мережі завжди існує протиріччя між рівнем живучості мережі і її вартістю, тому в роботі пропонується подальший розвиток моделі [5], яка має два критерії, за якими виконується синтез мережі – максимізація живучості (суб'єктивної ймовірності функціонування мережі при деструктивних впливах) і мінімізація вартості обладнання мережі. Для спрощення реалізації моделі, ці два критерії об'єднані у один.

Деструктивні впливи на сучасні телекомунікаційні мережі. Для мультисервісних систем зв'язку деструктивні дії можна розглядати на різних рівнях моделі OSI [4].

На фізичному рівні деструктивні дії можуть бути природного (повені, пожежі, вплив грозових розрядів, тощо) і людського характеру (вибухи, підпали, помилки персоналу в експлуатації устаткування), несанкціоноване підключення до портів комутаторів і каналів зв'язку. Такі дії приводять до пошкодження каналів зв'язку і комутаційного обладнання. Зняття інформації з волоконно-оптичної лінії можливе при псуванні ізоляції оптичного кабеля, і підключення приладу для реєстрації випромінювання з поверхні волокна. Можливі атаки на WDM (Wavelength Division Multiplexing)-мультиплексори.

На каналному рівні, на основі трафіку, формуються кадри і виконується адресація. На цьому рівні можливо для зловмисника блокувати або знищувати з'єднання.

На мережевому рівні визначається маршрут і адресація. Зловмисник може замінити адресну інформацію підмінити інформацію в службових блоках, підмінити записи у базах міжмережевого інтерфейсу, підмінити записи в базах локального інтерфейсу. Це може привести до знищення з'єднань і втрати інформації.

Транспортний рівень відповідає за зв'язок між кінцевими пунктами. Тут можливі знищення з'єднання, зміна даних, параметрів обслуговування.

Сеансовий рівень забезпечує підтримку сеансу зв'язку. Рівень керує створенням і завершенням сеансу, обміном інформацією, визначенням права на передачу даних. Атаки проти певних комунікаційних сесій можуть проводитися шляхом запису сесії, і подальшої спроби підбору ключа сесії або ключа шифру. В разі успіху відкривається можливість прочитати передану інформацію.

На рівні представлення виконується перетворення протоколів і кодування/декодування даних. Запити додатків з прикладного рівня перетворюється в формат для передачі по мережі, а отримані з мережі дані перетворюються в формат додатків.

На прикладному рівні забезпечується взаємодія призначених для користувача додатків з мережею. Тут можливий несанкціонований доступ до інформації у вузлах комутації і каналах зв'язку.

Всі мережі множинного доступу мають спільний канал передачі даних, внаслідок чого, із-за злочинних дій, можливий вихід з ладу цілого сегменту мережі.

Загальна схема методики оптимізації живучості телекомунікаційної мережі має такий вигляд:

1) На основі аналізу можливих деструктивних впливів, знаходять оптимальну структуру всіх радіально-ієрархічних складових телекомунікаційної мережі.

2) Далі знаходять структуру кільцевої складової телекомунікаційної мережі.

3) На основі отриманих результатів, обчислюють загальний рівень живучості телекомунікаційної мережі. Якщо рівень живучості виявиться недостатнім, то розрахунки повторюють, вводячи в мережу резервування пристроїв, або їх заміну на більш стійкі до наявного класу деструктивних впливів.

Модель синтезу структури радіально-ієрархічної складової телекомунікаційної мережі. Задачу синтезу структури радіально-ієрархічної телекомунікаційної мережі за критерієм підвищеної живучості можна сформулювати так: знайти такі невідомі X_{ij} , які дають максимум функції живучості V мережі, де X_{ij} – невідомі елементи матриці підключень,

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{– якщо } j\text{-й пристрій мережі підключений до } i\text{-го,} \\ 0 & \text{– якщо } j\text{-й пристрій мережі не підключений до } i\text{-го;} \end{cases}$$

$$V = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n c_{ij} X_{ij} \rightarrow \max ,$$

де $c_{i,j}$ – корисність (суб'єктивна ймовірність живучості підключення j -го пристрою до i -го);

n – кількість елементів мережі.

Якщо необхідно синтезувати мережу з заданим рівнем живучості a , то функція живучості матиме вигляд

$$V = \left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n c_{ij} X_{ij} - a \right)^2 \rightarrow \min .$$

Якщо необхідно синтезувати мережу з максимальним рівнем живучості при мінімальному рівні вартості обладнання, то функція живучості матиме вигляд:

$$V = \frac{\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n c_{ij} X_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij} X_{ij}} \rightarrow \max , \quad (1)$$

де c_{ij} – корисність (суб'єктивна ймовірність живучості підключення j -го пристрою до i -го);
 s_{ij} – вартість j -го пристрою мережі підключеного до i -го пристрою;
 n – кількість пристроїв мережі.

Крім того, суб'єктивна ймовірність c_{ij} живучості підключеного j -го пристрою до i -го пов'язана з вартістю обладнання таким співвідношенням:

$$c_{ij} = 1 + (c_{ij}^0 - 1)e^{-\alpha(s_{ij} - s_{ij}^0)}, \quad (2)$$

де c_{ij}^0 – початкова суб'єктивна ймовірність c_{ij} живучості j -го пристрою підключеного до i -го;
 s_{ij}^0 – початкова вартість j -го пристрою підключеного до i -го;
 s_{ij} – текуча вартість j -го пристрою підключеного до i -го; α – коефіцієнт.

При цьому, повинні виконуватися наступні обмеження, які впливають з раніше визначених властивостей структур телекомунікаційних мереж:

1. До одного елемента вищого рівня не може підключатися більше P елементів нижчого рівня.

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq P, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (3)$$

де P – максимальна кількість пристроїв підключених до пристрою вищого рівня ієрархії;
 X_{ij} – невідомі елементи матриці підключень.

2. Кожний елемент структури мережі має бути підключений не більше ніж до одного вищестоящого елемента (один елемент може бути головним і нікому не підпорядковуватися).

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq 1, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (4)$$

де X_{ij} – невідомі елементи матриці підключень.

Це обмеження означає, що у кожному стовпці матриці підпорядкувань має бути не більше ніж одна одиниця. Може бути один стовпець з елементом найвищого рівня ієрархії, який нікому не підпорядковується. У такому стовпці стоять лише нулі, тому сума елементів такого стовпця буде дорівнювати 0. Однак, може трапитися випадок, коли умова (4) виконується ($\sum_{i=1}^n X_{ij} = 0$), але елемент у цьому випадку є ізольованим (він ні до чого не підключений і до нього пристрої не підключені), що не припускається у структурі мережі. Для недопущення такого випадку використовується умова (5).

3. Кожний елемент структури мережі має хоча б один зв'язок підпорядкування, тобто він не може бути ізольованим, автономним, без підключення.

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} + \sum_{k=1}^n X_{jk} \geq 1, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (5)$$

де X_{jk} – невідомі елементи матриці підключень, що визначають значення підпорядкування k -го елемента (k -го стовпчика таблиці підпорядкувань) j -му елементу (j -му рядку таблиці підпорядкувань).

Тобто, кожен елемент має бути хоча б комусь підпорядкований, або йому має бути підпорядкований хоча б якийсь елемент. Говорячи мовою таблиці підпорядкувань, це означає, що сума елементів стовпця і рядка з тим самим номером має бути не менша за одиницю.

4. Всього зв'язків підпорядкування має бути на одиницю менше ніж кількість всіх елементів структури мережі, тому що кожен елемент, за винятком одного (головного), має бути комусь підпорядкований.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} = n - 1. \quad (6)$$

Оскільки у кожному з $(n-1)$ стовпців матриці має бути по одній одиниці, а у одному стовпці, якому відповідає головний елемент, жодної, то сума усіх елементів матриці підключень має дорівнювати $n-1$.

5. У системі не повинно бути циклічних зв'язків підключення, коли вищестоящий елемент підпорядковується нижчестоящому елементу, який йому підпорядкований безпосередньо, або через низку елементів проміжних рівнів.

Ця умова задається виразом (7), одержаним з аналізу графів структур радіально-ієрархічних мереж.

Для того, щоб n -вершинний граф G з матрицею суміжності $A = A(G)$ не мав контурів, необхідно і досить, щоб матриця $B = A^2 + A^3 + \dots + A^n$ мала нульові діагональні елементи.

Тобто

$$B = \sum_{k=2}^n |X_{ij}|^k, \quad \sum_{i=1}^n b_{ii} = 0, \quad (7)$$

де $|X_{ij}|$ – матриця підключень; X_{ij} – невідомі елементи матриці підключень; b_{ii} – елементи головної діагоналі матриці B ; n – кількість елементів у структурі.

Модель синтезу структури кільцевої складової телекомунікаційної мережі. Нехай X_i – невідомі елементи кільцевої складової телекомунікаційної мережі задаються так:

$$X_i = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-й пристрій включено до кільцевої структури,} \\ 0 - \text{якщо } i\text{-й пристрій не включено до кільцевої структури.} \end{cases}$$

Тоді для кільцевої структури має місце таке співвідношення.

$$\sum_{i=1}^n D_{ij} X_i = \sum_{i=1}^n B_{ij} X_i,$$

де $D_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-й пристрій має вихід } j\text{-го виду,} \\ 0 - \text{якщо } i\text{-й пристрій не має вихід } j\text{-го виду;} \end{cases}$

$$B_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-й пристрій має вхід } j\text{-го виду,} \\ 0 - \text{якщо } i\text{-й пристрій не має входу } j\text{-го виду.} \end{cases}$$

Побудуємо матрицю C_{ij} так $C_{ij} = D_{ij} - B_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-й пристрій має вихід } j\text{-го виду,} \\ -1 - \text{якщо } i\text{-й пристрій має вхід } j\text{-го виду,} \\ 0 - \text{у решті випадків.} \end{cases}$

Сформульована проблема може бути описана такою задачею булевого програмування: максимізувати функцію живучості V

$$V = \prod_{i=1}^n a_i X_i \rightarrow \max, \quad (8)$$

при таких обмеженнях:

$$\sum_{i=1}^n C_{ij} X_i = 0, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

де a_i – суб'єктивна ймовірність функціонування i -го пристрою при деструктивних впливах зовнішнього середовища;

n – кількість пристроїв, що включені в кільцеву структуру мережі;

m – кількість видів входів пристроїв.

Якщо необхідно максимізувати живучість при мінімальній вартості обладнання, то замість (8) використовується вираз

$$V = \frac{\prod_{i=1}^n a_i X_i}{\sum_{i=1}^n s_i X_i} \rightarrow \max,$$

де s_i – вартість i -го пристрою в кільцевій структурі мережі.

Інколи існує потреба включити до кільцевої складової телекомунікаційної мережі не більше ніж L пристроїв. У цьому випадку, до обмеження (9) необхідно додати таке обмеження:

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq L .$$

Живучість V радіально-кільцевої телекомунікаційної мережі визначається як

$$V = \prod_{i=1}^T V_{R_i} \times \prod_{i=1}^M V_{K_i} ,$$

де V_{R_i} – живучість i -ої радіально-ієрархічної складової мережі;

T – кількість радіально-ієрархічних складових мережі;

M – кількість кільцевих складових мережі;

V_{K_i} – живучість i -ої кільцевої складової мережі.

Якщо експерт або група експертів оцінюють ймовірність настання тієї або іншої випадкової події на основі досвіду, наявної інформації і інтуїції, а не частоти появи події, то така ймовірність називається суб'єктивною ймовірністю [6]. Суб'єктивна ймовірність має використовуватися коли випадкові події не носять масового характеру, що відбуваються в однакових умовах. До класу таких подій відносяться і деструктивні впливи на телекомунікаційні мережі.

Розробляється підхід до визначення суб'єктивної ймовірності порушень мережі на основі знань про порушення, що акумулюються в структурно-графових об'єктах [7] і відповідних їм семантичних структурах [8]. На основі таких знань експерти оцінюють величини суб'єктивних ймовірностей a_i і $c_{i,j}$ необхідних для формування телекомунікаційної мережі. Реалізація моделей виконується статистичним методом з детермінованим навчанням [9].

Залежність живучості мережі від вартості обладнання наведено на Рис. 1. Вартість представлена у відносних одиницях. Як видно з Рис.1, при деякому рівні витрат на резервування необхідних елементів мережі, живучість стає близькою до максимальної і подальше збільшення витрат не доцільне, оскільки не приводить до суттєвого збільшення живучості.

Висновки. Запропонована в роботі модель побудови живучої комп'ютерної мережі з врахуванням вартості обладнання є подальший розвиток моделі розробленої автором у [5] і дозволить синтезувати мережі більш високого рівня оптимальності.

На відміну від існуючих методик, розроблена методика побудови живучих телекомунікаційних мереж базується на використанні двох моделей – для розрахунку радіально-ієрархічних складових мережі і кільцевих складових. Такий підхід дозволить проводити аналіз живучості більш якісно.

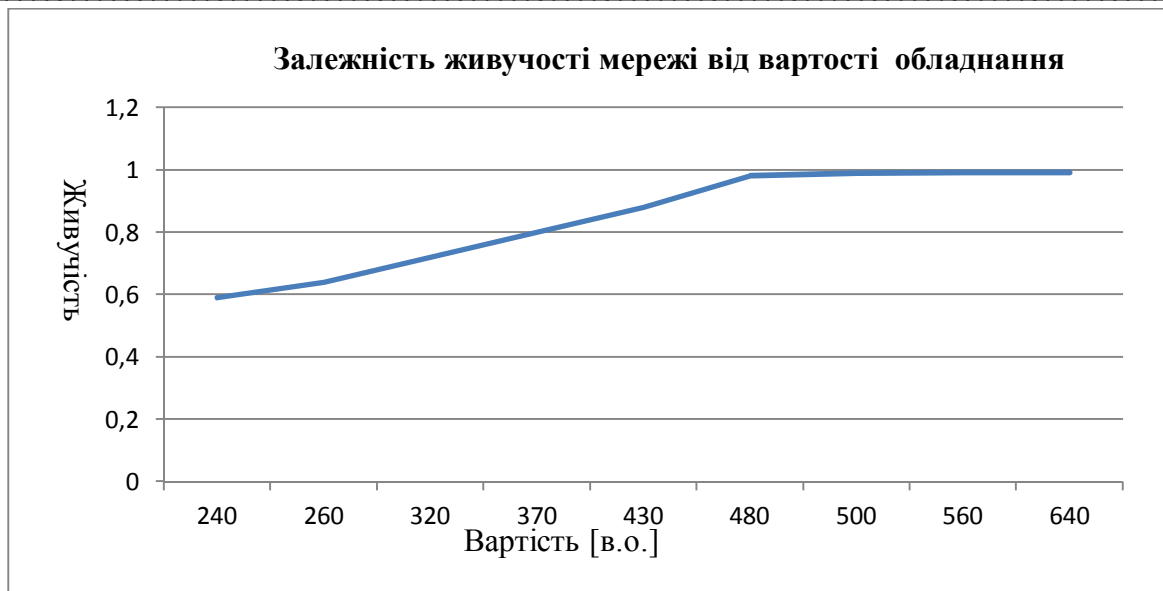


Рис. 1. Залежність живучості мережі від вартості обладнання

Література

1. Величко В. В. Телекоммуникационные системы и сети : учебное пособие. В 3 томах. Том 3. – Мультисервисные сети / В. В. Величко, Е. А. Субботин, В. П. Шувалов, А. Ф. Ярославцев; под ред. В. П. Шувалова. – Москва : Горячая линия –Телеком, 2005. – 502 с.
2. Гургенидзе А. Т. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступ / А. Т. Гургенидзе А. Т., В. И. Кореш. – Москва : Наука и техника, 2003. – 400 с.
3. Гольдштейн Б. С. Сети связи : учебник для ВУЗ-ов. Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.
4. Птицын Г. А. Живучесть динамических систем связи / под ред. А. В. Петракова. – Москва : МТУСИ, 2008. – 98 с.
5. Бондаренко В. Є. Система-порадник для побудови топології живучої комп'ютерної мережі / В. Є. Бондаренко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – № 5(33). – С. 65-72.
6. Бондаренко В. Є. Елементи суб'єктивної теорії ймовірностей для оцінки можливості шкідливих впливів і деструктивних дій в комп'ютерних мережах / В. Є. Бондаренко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – № 4(32). – С. 17-21.
7. Бондаренко В.Є. Розробка апарату структурно-графових об'єктів як засобу побудови моделей для дослідження живучості комп'ютерних мереж / В. Є. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №5/9(71). – С. 56-59.
8. Бондаренко В. Є. Концепція семантичних структур для моделювання і аналізу живучості комп'ютерних мереж / В. Є. Бондаренко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №3. – С. 70-74.
9. Бондаренко В. Е. Статистический метод поиска экстремума с детерминированным обучением / В. Е. Бондаренко // Гибридные вычислительные машины и комплексы. – 1989. – Вып. 12. – С. 40 - 45.

Дата надходження в редакцію: 09.03.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л. Н. Беркман