

УДК 681.324

Бондаренко В. Є., докт. техн. наук

ЗАДАЧА ПОБУДОВИ ЗАМКНУТИХ СИСТЕМ ТА ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЯ ДЛЯ СИНТЕЗУ ЖИВУЧИХ КІЛЬЦЕВИХ ТРАНСПОРТНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Bondarenko V. Ye. The task of closed systems building and its implementation for the synthesis of survivable ring transport telecommunications networks. The paper is put the problem of a closed systems building. In a frame of this task inserts a lot of technical and economic problems, particularly the problem of the synthesis of survivable transport telecommunications network, which consists of ring elementary structures, taking into account the cost of providing survivability. On the basis of the proposed model, is built the new method of synthesis of survivable ring telecommunications transport networks. The proposed methodology is based on a model that can be embedded in a framework of non-linear Boolean programming. The model has two criteria – maximize survivability (subjective probability of the network at the destructive effects) and minimizing the cost of network equipment. To simplify the implementation of models, these two criteria are combined into one. The methodology also takes into account the cost of the equipment to ensure survivability. The paper provides examples of the synthesis of ring telecommunication transport networks.

Keywords: closed system, survivability, telecommunication network, Boolean programming

Бондаренко В. Є. Задача побудови замкнених систем та її реалізація для синтезу живучих кільцевих транспортних телекомунікаційних мереж. В роботі формулюється задача побудови замкнених систем і пропонується математична модель, яка дозволяє отримати її рішення. Розглянута задача синтезу і моделювання живучої транспортної телекомунікаційної мережі, яка складається з кільцевих елементарних структур з врахуванням вартості забезпечення живучості. Модель має два критерії – максимізація живучості (суб'єктивної ймовірності функціонування мережі) і мінімізація вартості обладнання мережі. Для спрощення реалізації моделі, ці два критерії об'єднані у один.

Ключові слова: замкнута система, живучість, комп'ютерна мережа, булеве програмування

Бондаренко В. Е. Задача построения замкнутых систем и ее реализация для синтеза живучих кольцевых транспортных телекоммуникационных сетей. В работе формулируется задача построения замкнутых систем и предлагается математическая модель, которая позволяет получить ее решение. Рассмотрена задача синтеза и моделирования живучей транспортной телекоммуникационной сети, которая состоит из кольцевых элементарных структур с учетом стоимости обеспечения живучести. Модель имеет два критерия – максимизация живучести (субъективной вероятности функционирования сети) и минимизация стоимости оборудования сети. Для упрощения реализации модели эти два критерия объединены в один.

Ключевые слова: замкнутая система, живучесть, компьютерная сеть, булево программирование

Вступ. В XXI сторіччі телефонна мережа загального користування, мережа мобільного зв'язку, мережа документального електров'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]. При відповідній апаратній підтримці мережі з пакетною комутацією, використовуючи сучасні технології MPLS, IP-MPLS, PON, WiMAX та ін., можливо реалізувати концепцію єдиного, конвергентного середовища передачі мультимедійного трафіку – цифрових даних, голосової телефонії, телебачення і т. п.

Однією з перспективних пакетних технологій побудови транспортних телекомунікаційних мереж є MPLS (Multiprotocol Label Switching) технологія і її модифікації IP/MPLS, MPLS-TP.

Мережа, побудована за технологією MPLS (Рис. 1), є ієрархічною і має дворівневу архітектуру. Перший рівень ієрархії опорної мережі (ядра мережі) складається з маршрутизаторів LSR (Label Switch Routers), які здійснюють комутацію по мітках. У якості LSR-маршрутизаторів застосовуються комутуючі Р-маршрутизатори (маршрутизатори провайдера), які поєднують в собі функції маршрутизатора IP і комутатора. На другому рівні ієрархії у периферійній або пограничній частині мережі провайдера знаходяться PE (Provider Edge) – маршрутизатори, до яких підключаються мережі користувачів транспортних послуг. Таке підключення виконується через крайові пристрої клієнта CE (Customer Edge).

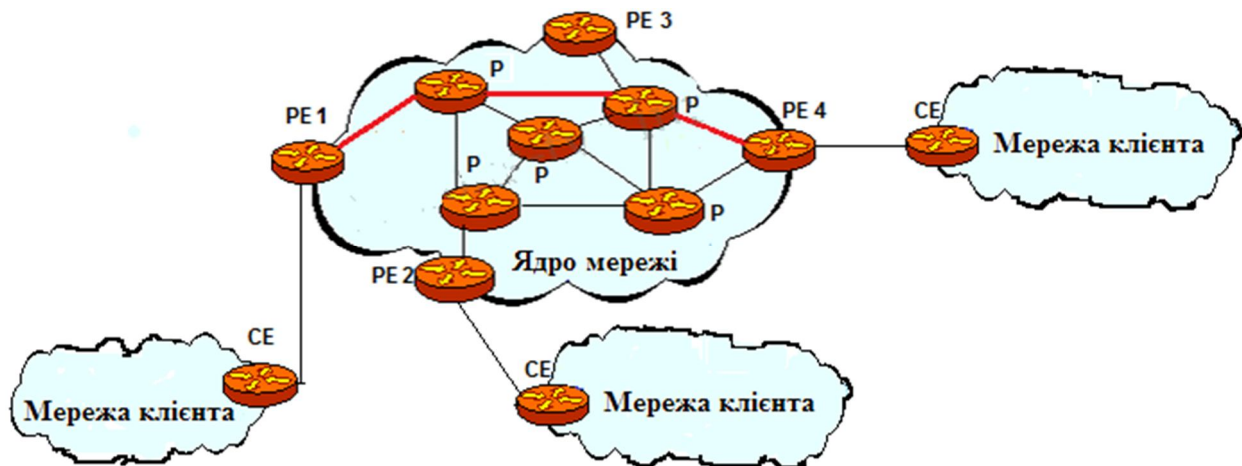


Рис. 1. Мережа провайдера на основі технології MPLS.

P-маршрутизатори визначають топологію мережі, будують свої таблиці комутації міток, вибирають ефективні шляхи проходження пакетів і, крім того, забезпечують комутацію трафіку по мітках і таблицях комутації.

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. Особливо важливий є перший рівень ієрархії ядра мережі, який, як правило, являє собою кільцеву складову мережі.

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.

Побудова замкнених систем. Нехай існує n приладів (вузлів мережі), кожен i -ий вузол з яких має S_i інформаційних виходів виду ψ_{ik} , де $k=1,2,\dots, S_i$ – вид виходу, i – номер вузла $i=1,2,\dots, n$. Крім того, кожен вузол i має R_i входів виду φ_{ij} , де $j=1,2,\dots, R_i$ – вид входу i -го вузла.

Треба відзначити, що мережа будується таким чином, що вихід деякого вузла може бути приєднаний до входу іншого вузла тільки тоді, коли вид виходу співпадає з видом входу іншого вузла. Тобто k -ий вихід i -го вузла може бути приєднаний до j -го входу q -го вузла тільки тоді, коли $\psi_{ik}=\varphi_{qj}$.

Замкнута система являє собою таку множину вузлів, кожен вихід яких є входом для деякого вузла з цієї множини і навпаки кожен вхід будь-якого вузла пов'язаний з деяким виходом якогось вузла з цієї множини.

Будемо вважати, що мережна система буде мати найвищу живучість коли вона буде сформована з таких приладів, які використовуються повністю, тобто по можливості кожен вихід і вхід кожного вузла має бути задіяний. Це пояснюється тим, що незадіяні входи і виходи вузлів, оскільки з них немає ніякої користі для роботи мережі, можна трактувати як несправні.

Тоді задача побудови живучої системи може бути сформульована так. Знайти з даних n приладів такі T приладів ($T \leq n$), які б не мали незадіяних входів і виходів.

Для рішення сформульованої задачі, введемо змінну

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

Тоді для мережі має місце співвідношення.

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

де $j=1,2,\dots,m$ – загальна кількість видів виходів; $i=1,2,\dots,n$ – загальна кількість приладів;

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

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

Отже сформульована проблема може бути описана такою задачею булевого програмування: знайти максимум цільової функції (2) при обмеженнях (3):

$$V = \sum_{i=1}^n a_i X_i \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n C_{ij} X_i = 0, \quad j=1,2,\dots,m, \quad \text{де } C_{ij} = D_{ij} - B_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-й прилад має вихід } j\text{-го виду,} \\ -1 - \text{якщо } i\text{-й прилад має вхід } j\text{-го виду,} \\ 0 - \text{у решті випадків.} \end{cases} \quad (3)$$

Крім того, a_i – ваговий коефіцієнт, який можна трактувати як бажаність включення i -го приладу в мережу.

Може виникнути потреба сформулювати мережу не більше ніж з L приладів. У цьому разі, до задачі (2)-(3) необхідно додати таке обмеження.

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq L. \quad (4)$$

Можливо, в процесі рішення задачі (2)-(4) доцільно перейти від задачі булевого програмування до загальної задачі математичного програмування. Для цього до задачі (2)-(4)

необхідно додати замість $X_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ наступне обмеження:

$$X_i(1-X_i)=0, \quad i=1,2,\dots,n. \quad (5)$$

В процесі рішення задачі стандартним пакетом для пошуку рішення задач математичного програмування, може скластися ситуація коли кількість обмежень задачі більша за допустиме для пакета програм. В цьому разі, всі обмеження можна звести до двох обмежень такого типу:

$$\sum_{i=1}^n |X_i(1-X_i)| = 0; \quad \sum_{j=1}^m \left| \sum_{i=1}^n c_{ij} X_i \right| = 0. \quad (6)$$

Вирішення задачі (2)-(5) може бути виконано будь-яким методом умовної нелінійної оптимізації, наприклад, запропонованим автором [6].

Для прикладу побудови замкнутої системи, розглянемо задачу обміну картин для колекціонерів.

Задача 1. (Задача обміну для колекціонерів). Нехай є n колекціонерів картин, кожен з яких має деякий набір картин з множини картин потужністю m . Кожен колекціонер готовий віддати цей набір картин, які він має, але бажає замість них отримати інший набір картин. Знайти таку групу колекціонерів, які були б задоволені обміном, тобто віддали картини, які вони хотіли віддати і отримали картини, які вони хотіли отримати.

Нехай є 4 колекціонери (1,2,3,4) $n=4$ і шість картин (a, b, c, d, e, f) $m=6$. Побудуємо матрицю виходів $|D_{ij}|$. Тобто визначимо картини, які бажає віддати при обміні кожний колекціонер. Така матриця наведена у Табл. 1. Як видно з Табл. 1, перший колекціонер готовий віддати картини a, b, c; другий – d, f; третій – e, a четвертий – a, b.

Далі визначимо картини, які бажає отримати при обміні кожний колекціонер. Така матриця наведена у Табл. 2.

Матриця виходів $|D_{ij}|$ Табл. 1

		Картини					
		a	b	c	d	e	f
Колекціонери	1	1	1	1			
	2				1		1
	3					1	
	4	1	1				

Матриця входів $|B_{ij}|$ Табл. 2

		Картини					
		a	b	c	d	e	f
Колекціонери	1				1	1	
	2	1					
	3		1	1			1
	4			1			1

Як видно з Табл. 2, перший колекціонер бажає отримати картини d, e; другий – a; третій – b, c, f; четвертий – c, f.

Нехай a_i – вагові коефіцієнти, які можна трактувати як бажаність включення i -го колекціонера у групу обміну (замкнуту систему) дорівнюють 1, тобто ні один колекціонер не має привілей над іншими.

Вирішуючи задачу (2)-(3), отримуємо замкнуту систему обміну картин групою колекціонерів, яка наведена на Рис. 2.

Як видно, в групу обміну не потрапив четвертий колекціонер.

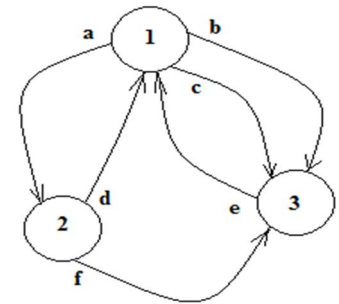


Рис. 2. Замкнута система обміну картин

Модель синтезу структури кільцевої транспортної телекомунікаційної мережі

В рамки задачі побудови замкнутих систем вписуються багато проблем техніки і економіки. Одна з таких проблем це проблема синтезу структури кільцевої транспортної телекомунікаційної мережі.

Нехай X_i – невідомі пристрої кільцевої складової телекомунікаційної мережі, наприклад, LSR-маршрутизатори (комутуючі Р-маршрутизатори) задаються так:

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

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

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

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

Сформульована проблема може бути описана такою задачею булевого програмування (7)-(9), а саме – максимізувати функцію живучості V :

$$V = \prod_{i=1}^n a_i X_i \rightarrow \max , \tag{7}$$

де a_i – суб'єктивна ймовірність функціонування i -го пристрою при деструктивних впливах зовнішнього середовища [7]; n – кількість LSR-маршрутизаторів, що включені в кільцеву структуру мережі; m – кількість видів входів LSR-маршрутизаторів.

У виразі (7) у добуток не включаються $X_i = 0$. Будемо вважати, що для LSR-маршрутизаторів усі порти вводу/виводу мають однаковий тип, а обмеженнями є

$$\sum_{i=1}^n C_{ij} X_i = 0, \quad j=1,2,\dots,m, \quad \text{де } m \neq 1. \quad (8)$$

Якщо необхідно максимізувати живучість при мінімальній вартості обладнання, то

замість (8) використовується вираз
$$V = \frac{\prod_{i=1}^n a_i X_i}{\sum_{i=1}^n s_i X_i} \rightarrow \max, \quad \text{де } s_i - \text{вартість } i\text{-го маршрутизатора}$$

в кільцевій структурі мережі.

Іноколи існує потреба включити до кільцевої телекомунікаційної мережі не більше ніж L маршрутизаторів. У цьому випадку, до обмеження (8) необхідно додати обмеження

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq L. \quad (9)$$

За моделлю (7)-(9) була розрахована живучість різних варіантів міської транспортної телекомунікаційної мережі (Рис. 3.), побудованої на основі MPLS-технології. Як правило, такі мережі будуються за кільцевою топологією на основі оптоволоконних магістральних ліній, використовуючи LSR-маршрутизатори і мають радіально-ієрархічні відгалуження. Для розглянутих прикладів матриці виходів і входів представлені в Табл. 3-4.

Таким чином, умова (8) означає, що кожний вихід кожного пристрою має слугувати входом для якогось іншого пристрою. В розрахованих варіантах кільцевої структури максимальна кількість LSR-маршрутизаторів в кільці має бути не більше за 4. Суб'єктивна ймовірність живучості кожного блоку – p . Загальна живучість кільцевих структур – V .

Матриця виходів $|D_{ij}|$ Табл. 3

		Номери портів виходів пристроїв				
		1	2	3	4	5
Номери пристроїв	1	1				
	2		1			
	3			1		
	4				1	
	5	1	1			
	6		1		1	

Матриця входів $|B_{ij}|$ Табл. 4

		Номери портів входів пристроїв				
		1	2	3	4	5
Номери пристроїв	1					
	2	1				
	3		1			
	4			1		
	5		1		1	
	6		1	1		

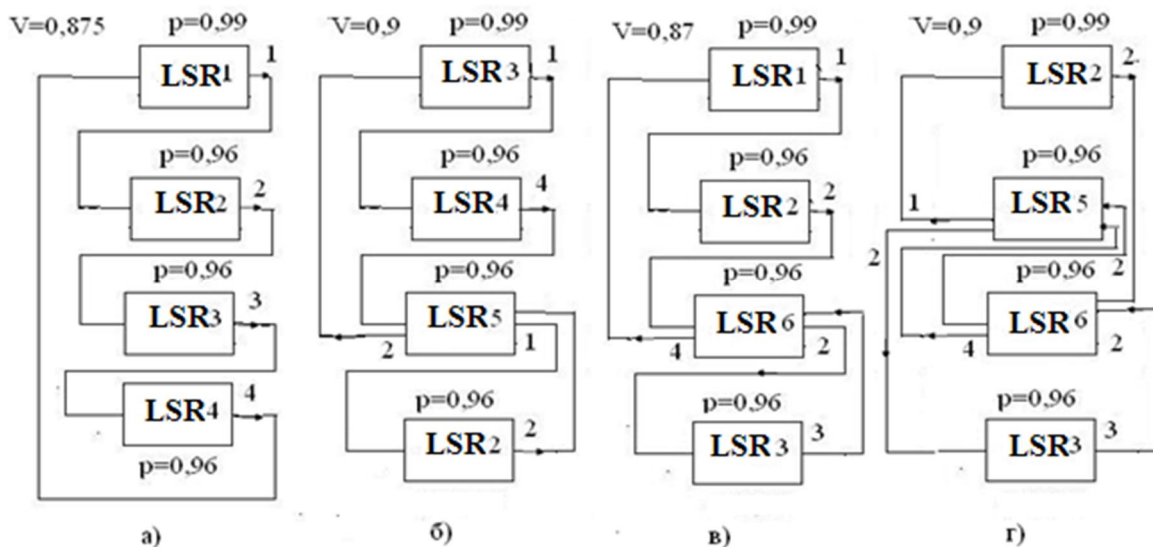


Рис. 3. Варіанти кільцевої структури міської транспортної телекомунікаційної мережі



Рис. 5. Подвійна кільцева структура транспортної мережі міста Роздільна

Метою проекту була розробка мережі міста, яка здатна забезпечити інтеграцію послуг традиційних телекомунікацій і Інтернету. Для побудови транспортної мережі на базі MPLS-технології використовується двонаправлене кільце зі 100% резервуванням у разі аварії на ділянках кільця.

На основі моделі (7)-(9), отримали живучість кільцевої структури на Рис. 4 на рівні $V=0,93$, а живучість кільцевої структури на Рис. 5 на рівні $V=0,96$. Однак, вартість обладнання у цьому випадку була на 30% вищою, тому було прийняте рішення включити в проект кільцеву транспортну структуру, наведену на Рис. 4.

Висновки

В роботі сформульована задача побудови замкнених систем, а також запропонована математична модель для її вирішення. На основі запропонованої моделі будується нова методика синтезу живучої кільцевої телекомунікаційної транспортної мережі. Запропонована методика базується на моделі, яка вкладається в рамки задачі нелінійного булевого програмування. Модель має два критерії – максимізація живучості (суб'єктивній ймовірності функціонування мережі при деструктивних діях) і мінімізація вартості устаткування мережі. Для спрощення реалізації моделей, ці два критерії об'єднано в один.

На основі вищезгаданої моделі, в роботі розроблена модель синтезу живучої транспортної телекомунікаційної мережі з врахуванням вартості обладнання.

Модель дозволить синтезувати перший рівень ієрархії опорної мережі (ядра мережі), побудованої за технологією MPLS, яка складається з маршрутизаторів LSR (Label Switch Routers), що комутують по мітках.

Література

1. Величко В. В. Телекоммуникационные системы и сети : учебное пособие. – В 3-х томах. Том 3. – Мультисервисные сети / В. В. Величко, Е. А. Субботин, В. П. Шувалов, А. Ф. Ярославцев; под ред. проф. В. П. Шувалова. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2005. – 502 с.
2. Гургенидзе А. Т. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа / А. Т. Гургенидзе, В. И. Кореш. – Москва : Наука и техника, 2003. – 400 с.
3. Гольдштейн Б. С. Сети связи : учебник для ВУЗов / Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.
4. Птицын Г. А. Живучесть динамических систем связи / Г. А. Птицын ; под ред. Петракова А. В. – Москва : МГУСИ, 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. Е. Статистический метод поиска экстремума с детерминированным обучением / В. Е. Бондаренко // Гибридные вычислительные машины и комплексы. – 1989. – Вып. 12. – С. 40-45.
7. 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.
8. Бондаренко В. Є. Теоретичні основи забезпечення живучості телекомунікаційних мереж на основі числення семантичних структур : дисертація доктора технічних наук ; спеціальність 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі / В. Є. Бондаренко – Київ: Державний університет телекомунікацій, 2015. – 306 с.

Автор статті

Бондаренко Віктор Євгенович – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел.: +380 (99) 520 62 19. E-mail : victorbondarenko@ukr.net

Author of the article

Bondarenko Victor Yevhenovych – doctor of sciences (technical), professor at computer systems and networks department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (99) 520 62 19. E-mail : victorbondarenko@ukr.net

Дата надходження в редакцію: 22.01.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. К. С. Козелкова