

УДК 621.396.96

В. Є. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, професор,  
Державний університет телекомунікацій, Київ;

С. А. МИКУСЬ, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник,

Національний університет оборони України ім. Івана Черняхівського, Київ;

Н. В. РУДЕНКО, ст. викладач, Державний університет телекомунікацій

**МОДЕЛІ СИНТЕЗУ ФУНКЦІОНАЛЬНО СТІЙКОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ**

*Запропоновано нові моделі синтезу функціонально стійкої комп'ютерної мережі, що включає в себе ієрархічні та кільцеві елементарні структури, з урахуванням вартості забезпечення функціональної стійкості. Розроблені моделі, вкладаючись у рамки задач нелінійного бульового програмування, задовольняють два критерії: максимізації функціональної стійкості (суб'єктивної ймовірності функціонування мережі при деструктивних впливах) і мінімізації вартості обладнання мережі.*

**Ключові слова:** функціональна стійкість; моделювання; комп'ютерні мережі; нелінійне бульове програмування.

**Вступ**

Сьогодні процеси взаємозближення, взаємопроникнення мереж набувають особливої виразності. А починалось усе з того, що телефонна мережа загального користування, мережа мобільного зв'язку, мережа документального електрозв'язку дістали поштовх до зближення з утворенням конвергентного інформаційного середовища. Усе це зрештою привело до об'єднання зазначених 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. За відповідної апаратної підтримки мережі з пакетною комутацією здатні, використовуючи сучасні технології ATM, SDH, MPLS, IP-MPLS, PON, WiMAX тощо, реалізувати концепцію єдиного конвергентного середовища передавання мультимедійного трафіку — цифрових даних, голосової телефонії, телебачення і т. ін. А оскільки комп'ютерна мережа безперервно зазнає деструктивних впливів соціально-фізичного середовища, в якому вона функціонує [4], то актуалізується проблема розробки функціонально стійких комп'ютерних мереж, які можуть чинити опір таким впливам, зберігаючи свою роботоздатність. Окрім того, при проектуванні функціонально стійкої комп'ютерної мережі завжди постає суперечність між рівнем функціональної стійкості мережі та її вартістю, тому в цій статті пропонується подальший розвиток моделі [5], яка має задовольняти два критерії, за якими виконується синтез мережі: максимізації функціональної стійкості (суб'єктивної ймовірності функціонування мережі при деструктивних впливах) і мінімізації вартості обладнання мережі. Для спрощення реалізації моделі ці два критерії об'єднано в один.

**Деструктивні впливи****щодо сучасних комп'ютерних мереж**

Стосовно 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 антропогенного характеру (вибухи, підпали, помилки персоналу в експлуатації устаткування, несанкціоноване підімкнення до портів комутаторів і каналів зв'язку). Усі такі дії призводять до пошкодження каналів зв'язку та комутаційного обладнання. Наприклад, зняття інформації з волоконно-оптичної лінії можливе через пошкодження ізоляції оптичного кабелю та під'єднання приладу для реєстрації випромінювання з поверхні волокна. Наприклад, становлять небезпеку атаки на WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) мультиплексори.

**На каналному рівні** на основі трафіку формуються кадри та виконується адресація. На цьому рівні зловмисник може блокувати чи знищувати з'єднання.

**На мережному рівні**, де визначається маршрут і здійснюється адресація, зловмисник може замінити адресну інформацію, підмінити інформацію в службових блоках, підмінити записи в базах міжмережного інтерфейсу, підмінити записи в базах локального інтерфейсу, призвівши до знищення з'єднань і втрати інформації.

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

**Сеансовий рівень** забезпечує підтримку сеансу зв'язку, керуючи створенням і завершенням сеансу, обміном інформацією, визначенням права на передавання даних. Атаки проти певних комунікаційних сесій можуть являти собою спроби запису сесії з подальшим добором ключа сесії або ключа RSA. У разі успіху цих дій уможлиблюється прочитання переданої інформації.

**На рівні подання** відбувається перетворення протоколів і кодування/декодування даних. Запити додатків із прикладного рівня перетворюються у формат для передавання по мережі, а отримані з мережі дані перетворюються у формат додатків.

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

Усі мережі множинного доступу мають спільний канал передавання даних, а отже, унаслідок злочинних дій можливий вихід із ладу цілого сегмента мережі.

### Модель синтезу структури радіально-ієрархічної складової комп'ютерної мережі

Задачу синтезу структури радіально-ієрархічної комп'ютерної мережі за критерієм підвищеної функціональної стійкості можна сформулювати так:

знайти невідомі  $X_{ij}$ , що забезпечують максимум функціональної стійкості  $V$  мережі, де  $X_{ij}$  — невідомі елементи матриці підімкнень,

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

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

де  $c_{i,j}$  — корисність (суб'єктивна ймовірність функціональної стійкості підімкнення  $j$ -го пристрою до  $i$ -го);  $n$  — кількість елементів мережі.

Якщо необхідно синтезувати мережу із заданим рівнем  $a$  функціональної стійкості, то вираз для функціональної стійкості набирає вигляду

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

Якщо необхідно синтезувати мережу з максимальним рівнем функціональної стійкості за мінімальною вартістю обладнання, то вираз для функціональної стійкості подається так:

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

де  $c_{i,j}$  — корисність (суб'єктивна ймовірність функціональної стійкості підімкнення  $j$ -го пристрою до  $i$ -го);  $n$  — кількість пристроїв мережі;  $s_{ij}$  — вартість  $j$ -го пристрою мережі, підімкненого до  $i$ -го пристрою. Окрім того, суб'єктивна ймовірність  $c_{i,j}$  функціональної стійкості підімкненого  $j$ -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  $c_{i,j}$  функціональної стійкості  $j$ -го пристрою, підімкненого до  $i$ -го;  $s_{ij}^0$  — початкова вартість  $j$ -го пристрою, підімкненого до  $i$ -го;  $s_{ij}$  — поточна вартість  $j$ -го пристрою, підімкненого до  $i$ -го;  $\alpha$  — деякий коефіцієнт.

При цьому мають виконуватися наведені далі обмеження, які впливають із раніше визначених властивостей структури комп'ютерної мережі.

1. До одного елемента вищого рівня не може бути підімкнено більш як  $P$  елементів нижчого рівня:

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

де  $P$  — максимальна кількість пристроїв, підімкнених до пристрою вищого рівня ієрархії;  $X_{ij}$  — невідомі елементи матриці підімкнень.

2. Кожний елемент структури мережі має бути підімкнений не більш ніж до одного елемента вищого рівня (це може бути головний і нікому не підпорядкований елемент).

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

де  $X_{ij}$  — невідомі елементи матриці підімкнень.

Це обмеження означає, що в кожному стовпці матриці підпорядкувань має бути не більш ніж одна одиниця. Може бути один стовпець з елементом найвищого рівня ієрархії, який нікому не підпорядковується. У такому стовпці містяться лише нулі, тому сума елементів такого стовпця дорівнюватиме нулю. Утім можливий випадок, коли умова (4) виконується  $\left( \sum_{i=1}^n X_{ij} = 0 \right)$ , але елемент є ізольований (він ні до чого не підімкнений і до нього жодний пристрій не підімкнений), що не припустимо згідно зі структурою мережі. Для уникнення такої ситуації використовується наведена далі умова.

3. Кожний елемент структури мережі має хоча б один зв'язок підпорядкування, тобто він не може бути ізольований, автономний, тобто без підімкнення:

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

де  $X_{jk}$  — невідомі елементи матриці підімкнень, що визначають значення підпорядкування  $k$ -го елемента ( $k$ -го стовпця таблиці підпорядкувань)  $j$ -му елементу ( $j$ -му рядку цієї таблиці).

Отже, кожен елемент має перебувати в деякому підпорядкуванні або йому має бути підпорядкований принаймні елемент. Говорячи мовою таблиці підпорядкувань, це означає, що сума елементів стовпця і рядка з тим самим номером має бути не менша за одиницю.

4. Усього кількість зв'язків підпорядкування має бути на одиницю менша за кількість усіх елементів структури мережі, оскільки кожен елемент, окрім одного (головного), має перебувати в деякому підпорядкуванні:

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

З огляду на те, що в кожному з  $(n - 1)$  стовпців матриці має бути по одній одиниці, а в одному стовпці, якому відповідає головний елемент, — жодної одиниці, то сума всіх елементів матриці підімкнень має дорівнювати  $n - 1$ .

5. У системі не повинно бути циклічних зв'язків підімкнення, коли елемент вищого рівня підпорядковується елементу нижчого рівня, який підпорядкований йому безпосередньо або через низку елементів проміжних рівнів.

Ця умова подається наведеним далі виразом, здобутим на підставі аналізу графів структур радіально-ієрархічних мереж.

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

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

де  $|X_{ij}|$  — матриця підімкнень,  $X_{ij}$  — невідомі елементи цієї матриці;  $b_{ii}$  — елементи головної діагоналі матриці  $B$ ;  $n$  — кількість елементів у структурі.

### Модель синтезу структури кільцевої складової комп'ютерної мережі

Нехай  $X_i$  — невідомі елементи кільцевої складової комп'ютерної мережі, задаються так:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й пристрій включено до кільцевої структури;} \\ 0 & \text{— у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Тоді для кільцевої структури виконується таке співвідношення:

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

де

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

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й пристрій має вхід } j\text{-го виду;} \\ 0 & \text{— у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Побудуємо матрицю

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

Сформульовану проблему можна описати як задачу бульового програмування:

максимізувати функцію  $V$  функціональної стійкості

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

за таких обмежень:

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

де  $a_i$  — суб'єктивна ймовірність функціонування  $i$ -го пристрою при деструктивних впливах зовнішнього середовища;  $n$  — кількість пристроїв, включених у кільцеву структуру мережі;  $m$  — кількість видів входів пристроїв.

Якщо необхідно максимізувати функціональну стійкість за мінімальної 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.

Іноді постає потреба включити до кільцевої складової комп'ютерної мережі не більш ніж  $L$  пристроїв. У цьому разі до умови (9) необхідно додати таке обмеження:

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

Функціональна стійкість  $V$  радіально-кільцевої комп'ютерної мережі визначається як

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

де  $V_{R_i}$  — функціональна стійкість  $i$ -ї радіально-ієрархічної складової мережі;  $T, M$  — кількість відповідно радіально-ієрархічних і кільцевих складових мереж;  $V_{K_i}$  — функціональна стійкість  $i$ -ї кільцевої складової мережі.

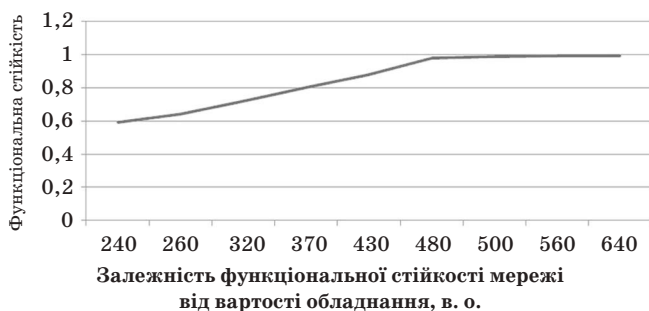
Якщо експерт або група експертів оцінюють вірогідність настання тієї чи іншої випадкової події на базі досвіду, наявної інформації та інтуїції, а не на основі частоти появи події, то така вірогідність називається *суб'єктивною ймовірністю* [6]. Суб'єктивна ймовірність має використовуватися тоді, коли випадкові події не мають масового характеру, й відбуваються за однакових умов. До класу таких подій належать і деструктивні впливи на комп'ютерні мережі.

Розробляється підхід до визначення суб'єктивної ймовірності порушень мережі на підставі знань про порушення, зосереджених у структурно-графових об'єктах [7] і відповідних їм семантичних структурах [8]. Реалізацію моделі було виконано статистичним методом із детермінованим навчанням [9].

Кількість операцій, необхідних для синтезу функціонально стійкої комп'ютерної мережі запропонованим методом, порівняно з повним перебором варіантів унаочнює рисунок. Як бачимо, при кількості елементів мережі, більшій за 35, кількість операцій у процесі повного перебору для пошуку найкращого варіанта структури мережі різко зростає.

Натомість кількість операцій у процесі пошуку найкращого варіанта структури мережі згідно із запропонованим методом *практично не залежить від максимальної кількості пристроїв*, підімкнених до пристрою вищого рівня ієрархії мережі (параметр  $P$  моделі).

Залежність функціональної стійкості мережі від вартості обладнання також унаочнює рисунок, де вартість подано у відносних одиницях (в. о.). Як впливає з рисунка, при деякому рівні витрат на резервування необхідних елементів мережі функціональна стійкість стає близька до максимальної і подальше збільшення витрат не має сенсу, оскільки не приводить до суттєвого збільшення функціональної стійкості.



### Висновки

Пропонована модель побудови функціонально стійкої комп'ютерної мережі з урахуванням вартості обладнання являє собою вагомий внесок у подальший розвиток моделі, розробленої в [5], що дозволить синтезувати мережі вищого рівня оптимальності.

Розроблена методика побудови функціонально стійких комп'ютерних мереж базується на використанні двох моделей, одна з яких слугує для розрахунку радіально-ієрархічних складових мережі, а друга — для розрахунку кільцевих її складових. Такий підхід забезпечує значно ґрунтовніший аналіз функціональної стійкості мережі.

### Література

1. **Телекоммуникационные системы и сети:** учеб. пособие: в 3 т. / [В. В. Величко, Е. А. Субботин, В. П. Шувалов, А. Ф. Ярославцев; под ред. проф. В. П. Шувалова].— М.: Горячая линия–Телеком.

Т. З. Мультисервисные сети.— 2005.— 502 с.

2. **Гургенидзе, А. Т.** Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа / А. Т. Гургенидзе, В. И. Кореш.— М.: Наука и техника, 2003.— 400 с.

3. **Гольдштейн, Б. С.** Сети связи: учебник для вузов / Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский.— СПб.: БХВ-Петербург, 2010.— 400 с.

4. **Птицын, Г. А.** Живучесть динамических систем связи / Г. А. Птицын; под ред. А. В. Петракова.— М.: МТУСИ, 2008.— 98 с.

5. **Бондаренко, В. Є.** Система-порадник для побудови топології живучої комп'ютерної мережі / В. Є. Бондаренко // Наук. записки УНДІЗ.— 2014.— № 5(33).— С. 17–21.

6. **Бондаренко, В. Є.** Елементи суб'єктивної теорії ймовірностей для оцінювання можливості шкідливих впливів і деструктивних дій у комп'ютерних мережах / В. Є. Бондаренко // Наук. записки УНДІЗ.— 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 // Восточ.-Европ. журн. 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. Є.** Статистический метод поиска экстремума с детерминированным обучением / В. Є. Бондаренко // Гибридные вычислительные машины и комплексы.— 1989.— Вып. 12.— С. 40–45.

10. **Кравченко, Ю. В.** Сучасний стан та шляхи розвитку теорії функціональної стійкості / Ю. В. Кравченко, С. А. Микусь // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова.— 2013.— Вып. 68.— С. 60–68.

11. **Руденко, Н. В.** Управління апаратними і програмними ресурсами в комп'ютерній системі на основі методів і моделей штучного інтелекту / Ю. В. Кравченко, С. А. Микусь, Н. В. Руденко // Зв'язок.— 2014.— № 1.— С. 19–24.

В. Є. Бондаренко, С. А. Микусь, Н. В. Руденко

### МОДЕЛИ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНО СТОЙКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ

Предложены новые модели синтеза функционально устойчивой компьютерной сети, которая состоит из иерархических и кольцевых элементарных структур с учетом стоимости обеспечения функциональной устойчивости. Разработанные модели, укладывающиеся в рамки задач нелинейного булевого программирования, удовлетворяют двум критериям — максимизации функциональной устойчивости (субъективной вероятности функционирования сети при деструктивных воздействиях) и минимизации стоимости оборудования сети.

**Ключевые слова:** функциональная устойчивость; моделирование; компьютерные сети; нелинейное булево программирование.

V. E. Bondarenko, S. A. Mykus, N. V. Rudenko

### THE MODEL OF SYNTHESIS OF FUNCTIONALLY STABLE COMPUTER NETWORK

The new model of synthesis of functionally stable computer network which consist of hierarchical and elementary ring structures taking into account the cost of providing functional stability. The models put into the framework of non-linear boolean programming problems. The model has two criteria-maximize functional stability (subjective probability of the network at the destructive effects) and minimizing the cost of network equipment.

**Keywords:** functional stability; simulation; computer networks; boolean nonlinear programming.