

УДК 681.324

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

СИСТЕМА-ПОРАДНИК ДЛЯ ПОБУДОВИ ТОПОЛОГІЇ ЖИВУЧОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

Бондаренко В. Є. Система-порадник для побудови топології живучої комп'ютерної мережі. У роботі запропонована нова математична модель, яка призначена для синтезу топології живучої комп'ютерної мережі. Така модель вписується у рамки задачі нелінійного булевого програмування. На основі вказаної моделі, розроблена система-порадник для визначення топології живучої комп'ютерної мережі. Реалізація моделі виконана на мові Visual-BASIC у середовищі системи MS EXCEL.

Ключові слова: система-порадник, математична модель, комп'ютерні мережі, живучість

Бондаренко В. Е. Система-советчик для построения топологии живучей компьютерной сети В работе предложена новая математическая модель, которая предназначена для синтеза топологии живучей компьютерной сети. Такая модель вписывается в рамки задачи нелинейного булевого программирования. На основе указанной модели, разработана система-советчик для определения топологии живучей компьютерной сети. Реализация модели выполнена на языке VISUAL-BASIC в среде системы MS EXCEL.

Ключевые слова: система-советчик, математическая модель, компьютерные сети, живучесть

Bondarenko V. Ye. The system-adviser for designing of a computer network topology of increased survivability. A new mathematical model is proposed for the synthesis of topology of a survivable computer network. Such model was written as the task of the Boolean nonlinear programming. On the basis of the indicated model, system-adviser was developed for designing of the topology of survivable computer networks. Realization of model was executed in the VISUAL-BASIC language in the environment of the MS EXCEL system.

Keywords: system-adviser, mathematical model, computer networks, survivability

Вступ. Реалізація функцій підтримання живучості складних організаційно-технічних систем, до класу яких належить і комп'ютерні мережі, вимагає створення структури системи, яка, звичайно, включає елементи (підсистеми) як технічні, так і організаційні. З досвіду відомо, що з однакової кількості підсистем можна створити різні за структурою системи. Звідси виникає проблема організації для певних умов сукупності підсистем і пристроїв в оптимальну (раціональну) структуру, з точки зору її живучості. Аналіз досліджень і публікацій з даної тематики [1, 2] показує, що існуючі роботи, що розглядають живучість комп'ютерних мереж, сконцентровані, переважно, лише на одному аспекті проблеми живучості і розглядають живучість лише апаратної складової.

Такий односторонній підхід до аналізу живучості не задовольняє сучасний рівень розвитку комп'ютерних мереж, в зв'язку з чим виникає протиріччя, для вирішення якого, необхідно розробити апарат, який би дозволив проводити комплексний аналіз живучості комп'ютерних мереж, враховуючи усі її напрямки у комплексі (програмні, інформаційні і організаційні аспекти).

Тому у роботі розробляється система-порадник для визначення варіанту раціональної організаційно-технічної структури, яка базується на використанні моделі, що будується на основі аналізу властивостей організаційно-технічних структур, і тому математично відображає структуру та функціонування організаційно-технічних систем. Така модель дозволяє з набору припустимих варіантів організаційно-технічних структур вибрати найкращий з точки зору живучості. Усі припустимі варіанти організаційно-технічних структур будуються на основі використання розробленої автором теорії семантичних структур[3], яка дозволяє формалізувати неформальні знання про організаційно-технічну систему, враховуючи всі аспекти живучості.

1. Математична модель живучої організаційно-технічної структури. Розглядаючи широкий спектр організаційно-технічних структур, можна виявити властивості, що притаманні усім структурам вказаного типу :

- Враховуючи особливості процесу управління, вважається, що до одного елемента який розташований вище (вищестоящий), не може підключено більше P елементів, які розташовані нижче (нижчестоящим).
- Кожен елемент структури, окрім головного, має бути підключений лише до одного елемента вищого рівня.
- Елемент структури не може бути ізольованим (тобто коли він нікому не підпорядковується і йому ніхто не підпорядковується).
- Всього зв'язків підключення має бути на одиницю менше ніж всіх елементів структури, тому що кожний елемент, за винятком одного (головного), має бути комусь підпорядкований.
- У системі виключається циклічне підпорядкування, коли розташований вище елемент підпорядковується розташованому нижче елементу безпосередньо або через низку елементів проміжних рівнів.

Нижче ці властивості будуть формалізовані.

Виходячи з вказаних вище закономірностей, сформуємо математичну модель організаційно-технічних структур.

Для побудови моделі зробимо припущення, що будь-яка структура певного формування (наприклад, комп'ютерної мережі) може бути відображена наведеною нижче таблицею (матрицею підпорядкування або підключення) (Табл. 1). Заповнення таблиці виконується числами 0 або 1. Ці числа будемо ставити у тій клітинці, яка знаходиться на перетині стовпця (j), що помічений підпорядкованим елементом, і рядка (i), поміченого елементом, якому підпорядковується j -й елемент. Нуль (0) будемо ставити, якщо j -й елемент не підпорядковується i -му, а 1 – коли j -й елемент підпорядковується i -му. При цьому $i, j = 1, 2, \dots, n$, де n – кількість елементів, що входять до організаційно-технічної структури.

Матриця підпорядкування Табл. 1

		Хто підпорядковується (j)						
		1	2	3	j	...	$n-1$	N
Кому підпорядковується (i)	1	0	0	0		...	$X_{1,n-1}$	$X_{1,n}$
	2	0	0	1		...	$X_{2,n-1}$	$X_{2,n}$
	3	1	1	0		...	...	...
		
	i			$X_{i,3}$	$X_{i,j}$	...	$X_{i,n-1}$	$X_{i,n}$

	n			$X_{n,3}$		...	...	$X_{n,n}$

Так, наприклад, якщо перший елемент ($j=1$) підпорядковується третьому ($i=3$), то на перетині першого стовпця і третього рядка ставимо 1, якщо другий елемент ($j=2$) не підпорядковується першому ($i=1$), то на перетині другого стовпця та першого рядка ставимо 0.

Позначимо елемент такої матриці як X_{ij} , при цьому $X_{ii} = X_{jj} = 0$ оскільки елемент не може підпорядковуватися сам собі. У загальному вигляді матриця має бути квадратною. В

окремому випадку, коли кількість елементів, які підпорядковуються і кількість елементів, кому підпорядковуються, не однакові, то матриця може бути прямокутною.

Таким чином,

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } j - \text{й елемент структури підключений до } i - \text{го.} \\ 0 - \text{якщо } j - \text{й елемент структури не підключений до } i - \text{го.} \end{cases}$$

Отже, матриця підпорядкування (Табл.1) відображає взаємозв'язки між елементами організаційно-технічної структури.

Далі визначимо критерій якості організаційно-технічної структури, за який приймемо її живучість (V). Для визначення цього критерію використовуються так звані корисності підпорядкування c_{ij} j -го елемента системи i -му, (на основі експертних оцінок) при $c_{ij} \in [0,100]$. При цьому під корисністю підпорядкування будемо розуміти ефект, покращення живучості системи, який можна одержати при підпорядкуванні j -го елемента системи i -му.

Корисності підпорядкування можна трактувати як суб'єктивні імовірності [4] живучості заданого зв'язку. Ці корисності можна представити у Табл. 2, яка подібна Табл.1.

**Корисності підпорядкування
(суб'єктивні ймовірності) Табл. 2**

		Хто підпорядковується (j)						
Кому підпорядковується (i)		1	2	3	j	...	$n-1$	N
	1	0	0	0		...	$c_{1,n-1}$	$c_{1,n}$
	2	10	0	1		...	$c_{2,n-1}$	$c_{2,n}$
	3	40	1	0		...	...	...
		
	i			$c_{i,3}$	$c_{i,j}$	...	$c_{i,n-1}$	$c_{i,n}$

	n			$c_{n,3}$		...	...	$c_{n,n}$

Наприклад, корисність підпорядкування першого елемента другому 10, корисність підпорядкування цього ж елемента третьому 40. Тобто суб'єктивна ймовірність того, що вказані зв'язки не будуть зруйновані відповідно 10% і 40% якщо ці зв'язки будуть мати місце у структурі. Визначимо цінність підпорядкування j -го елемента системи i -му як добуток $c_{ij}X_{ij}$. Тобто, якщо це підпорядкування буде включене до організаційно-технічної структури ($X_{ij}=1$), то його цінність буде дорівнювати корисності c_{ij} . А якщо це підпорядкування не буде обране (тобто $X_{ij}=0$), то його цінність буде дорівнювати 0. Але $c_{ij}X_{ij}$ дає живучість тільки підпорядкування одного елемента іншому. Для того, щоб отримати живучість усієї організаційно-технічної структури необхідно просумувати по стовпцях і рядках усі рівні живучості $c_{ij}X_{ij}$ підпорядкування j -х елементів структури i -м,

тобто матимемо $V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}X_{ij}$ – функцію живучості організаційно-технічної структури.

Отже, за допомогою Табл. 2 здійснюється зважування елементів таблиці 1 через корисності підпорядкування c_{ij} , які визначаються методами експертних оцінок. Звідси зрозуміло, що чим більшого значення досягає живучість V досліджуваної організаційно-технічної структури, тим краще (доцільніше) здійснений взаємозв'язок між її елементами.

Тоді, задачу обґрунтування раціональної організаційно-технічної структури можна сформулювати так: знайти такі невідомі X_{ij} , які дають максимум функції живучості V організаційно-технічної структури

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

де X_{ij} – невідомі елементи матриці підпорядкувань (елементи Табл. 1); c_{ij} – корисності підпорядкувань (елементи Табл.2); n – кількість елементів організаційно-технічної структури.

При цьому повинні виконуватися наступні обмеження, які впливають з раніше визначених властивостей організаційно-технічних структур:

1. Одному вищестоящому елементу не може підпорядковуватися більше P нижчестоящих елементів.

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

де P – максимальна кількість підпорядкованих елементів одному елементу вищого рівня ієрархії; X_{ij} – невідомі елементи матриці підпорядкувань (елементи Табл. 1).

2. Кожний елемент організаційно-технічної структури має бути підпорядкований не більше ніж одному вищестоящому елементу (один елемент може бути головним і нікому не підпорядковуватися).

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

де X_{ij} – невідомі елементи матриці підпорядкувань (елементи Табл. 1).

Однак, може трапитися випадок, коли умова (3) виконується ($\sum_{i=1}^n X_{ij} = 0$), але елемент у цьому випадку є ізольованим (він нікому не підпорядковується і йому ніхто не підпорядковується), що не припускається у організаційно-технічній структурі. Для недопущення такого випадку використовується наступна умова (4).

3. Кожний елемент структури організаційно-технічної системи має хоча б один зв'язок підпорядкування, тобто він не може бути ізольованим, автономним, без підпорядкування.

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

де X_{jk} – невідомі елементи матриці підпорядкувань (Табл.1), 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.

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

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} = n-1. \quad (5)$$

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 підпорядкувань має дорівнювати $n-1$.

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

Ця умова задається виразом (6), одержаним з аналізу графів організаційно-технічних структур.

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

$$B = \sum_{k=2}^n |X_{ij}|^k, \quad \sum_{i=1}^n b_{ii} = 0, \quad (6)$$

де $|X_{ij}|$ – матриця підпорядкувань; X_{ij} – невідомі елементи матриці підпорядкувань (елементи Табл.1); b_{ii} – елементи головної діагоналі матриці B ; n – кількість елементів у структурі.

Оскільки умова (6) нелінійна, то розглянуту модель (1)...(6) можна віднести до класу задач нелінійного програмування. Виходячи з того, що значення матриці підпорядкувань (рішень) можуть приймати значення лише 0 і 1, то така задача буде задачею нелінійного цілочисельного (булевого) програмування.

Як видно, модель (1)...(6) має $3n+2$ обмеження при кількості змінних X_{ij} , яка дорівнює для квадратної матриці n^2 , тому для отримання багатоваріантного рішення необхідно, щоб $n^2 > 3n+2$. З розв'язку цієї нерівності видно, що модель може працювати коли $n \geq 4$. Це означає, що на основі запропонованої моделі можуть аналізуватися організаційні структури з кількістю елементів не менше 4.

При $n=1,2,3$ кількість можливих варіантів побудови структури організаційно-технічної системи дуже обмежена, задача стає тривіальною і може бути проаналізована умоглядно без використання будь-якого апарату аналізу.

Корисності c_{ij} варіантів підпорядкування елементів (структур) іншим організаційним структурам виконує група з m експертів за наведеним нижче алгоритмом з можливим використанням T етапів оцінювання з метою підвищення його якості.

Алгоритм 1.

1. Корисність c_{ij} обчислюється як зважене середнє за такою формулою:

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \rho_k S_{ij}^k}{\sum_{k=1}^m \rho_k},$$

де ρ_k – коефіцієнт довіри до k -го експерта (на першому етапі оцінювання коефіцієнти довіри до усіх експертів однакові і дорівнюють 1); S_{ij}^k – корисність підпорядкування j -го елемента структури i -му елементу, що визначена k -им експертом; m – кількість експертів.

Корисності S_{ij}^k підпорядкування різних елементів (структур) організаційним структурам вищого рівня знаходяться кожним експертом на основі шкали корисності (Табл. 3), значення якої визначаються у межах від 0 до 100.

2. Коригується коефіцієнт довіри до k -го експерта за такою формулою:

$$\rho_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \rho_k^t,$$

де T – кількість етапів оцінювання; ρ_k^t – коефіцієнт довіри до k -го експерта на t -му етапі оцінювання; R_{ij} – апостеріорна корисність підпорядкування j -го елемента системи i -му (тобто корисність підпорядкування, яка визначена в процесі функціонування організаційно-

технічної структури); σ_k – коефіцієнт забування k -го експерта $\rho_k^t = e^{-\frac{(R_{ij}-S_{ij}^k)^2}{2\sigma_k}}$.

Шкала корисності підпорядкування елементів структур Табл. 3

Корисність підпорядкування j -го елемента i -му у структурі	Чисельне значення корисності (c_{ij})
Відсутня, або підпорядкування шкідливе	0
Незначна	1 – 10
Помітна	11 – 20
Близька до середньої	21 – 30
Середня	31 – 40
Вища середньої	41 – 50
Суттєва	51 – 60
Добра	61 – 70
Близька до високої	71 – 80
Висока	81 – 90
Дуже висока	91 – 100

Експерти узгоджують свою думку щодо підпорядкування кожного j -го елемента або структури i -тій структурі вищого рівня (c_{ij}). Остаточне формування (уточнення) організаційно-технічної структури мережі виконується на основі моделі, що являє собою задачу нелінійного булевого програмування (1)...(6).

Як програмний засіб реалізації моделі була вибрана система *Excel*, у якій алгоритмічна реалізація моделі була виконана на мові Visual-Basic.

2. Програма-порадник для синтезу комп'ютерної мережі з підвищеною живучістю.

Для синтезу комп'ютерної мережі розроблена програма-порадник. Для дослідження системи синтезу взято деревовидну структуру мережі (ієрархічна зірка).

Вихідні дані для синтезу комп'ютерної мережі: кількість елементів комп'ютерної мережі – 12; кількість підпорядкувань – 11; кількість експертів – 2; коефіцієнт забування експертів – 100; коефіцієнт довіри до експертів – 1.

Для початку роботи з програмою-порадником запускаємо на виконання файл SCS.xlsm. Відкривається головне вікно програми (Рис. 2.).

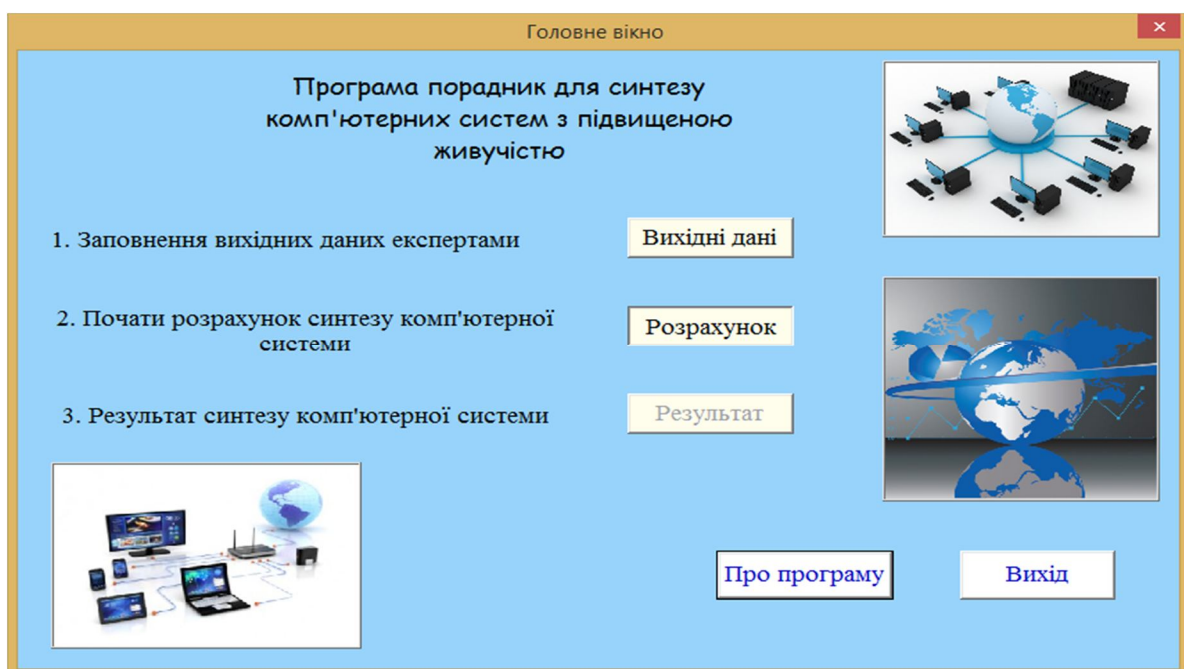


Рис. 2. Головне вікно програми-порадника.

Заповнюємо вихідні дані, для цього треба натиснути кнопку «Вихідні дані». Відкриється вікно «Оцінки експертів» (Рис. 3.), заносимо дані корисності підключення c_{ij} першого експерта.

Оцінки експертів

Кількість експертів: 2 Кількість елементів: 12 Кількість підпорядкувань: 4

ГОТОВО ВІДМІНА

ЕКСПЕРТ № 1 К-нт забування 100 К-нт довіри 1 НАСТУПНИЙ ЕКСПЕРТ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0		0	0	100	100	100	100	90	90	60	60
3	0	0		0	90	90	90	90	100	100	80	80
4	0	0	0		80	80	80	80	90	90	95	95
5	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рис. 3. Робоче вікно експертів

Аналогічно заносимо корисності c_{ij} другого експерта. Після чого, на головному вікні програми стане доступна кнопка «Розрахунок».

Натискаємо кнопку «Розрахунок» (Рис. 2) та чекаємо закінчення процесу розрахунку структури. Час, за який система обробить всі дані залежить від кількості елементів та експертів.

Після закінчення операції «Розрахунок» натискаємо кнопку «Результат».

Синтез комп'ютерної мережі з використанням моделі, (1)...(6) і даних дає результат у вигляді матриці X_{ij} , який представлений на Рис. 4.

R21C19		fx																																		
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37																
1																																				
2																																				
3																																				
4																																				
5																																				
6																																				
7																																				
8																																				
9																																				
10																																				
11																																				
12																																				
13																																				
14																																				
15																																				
16																																				
17																																				
18																																				
19																																				
35																																				
36																																				

Рис. 4. Результат синтезу мережі у вигляді матриці.

Результати розрахунку X_{ij} (Рис.4.) можуть бути представлені у зручному для сприйняття графічному вигляді, сформованої топології комп'ютерної мережі, яка наведена на Рис. 5.

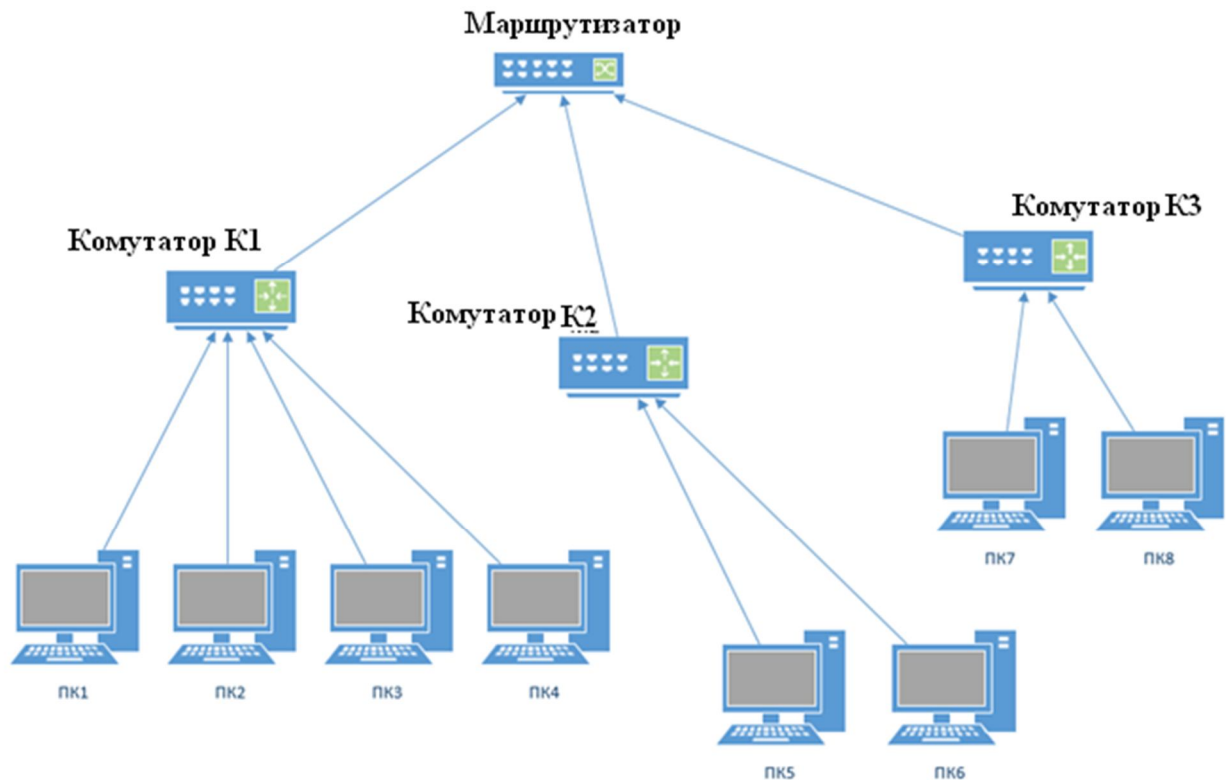


Рис. 5. Графічне представлення топології побудованої комп'ютерної мережі.

Висновки

1. Запропонований в роботі алгоритм дозволяє ефективно будувати групою експертів оцінки суб'єктивних ймовірностей подій деструктивних впливів на комп'ютерних мережах з урахуванням довіри до компетентності експертів, а також враховуючи швидкість зміни довіри до експертів особою, що приймає рішення.
2. Розроблена в роботі модель, що вписується в рамки нелінійного булевого програмування, забезпечує формування живучих структур будь-яких організаційно-технічних систем.
3. Розроблена на основі моделі формування живучих структур, програмна система дозволяє спеціалісту ефективно формувати топологію мережі, що забезпечує потрібний рівень її живучості.

Література

1. Стекольников Ю. И. Живучесть систем / Ю. И. Стекольников. – Санкт-Петербург: Политехника, 2002. – 155 с.
2. Додонов А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – Київ: Наукова думка, 2011. – 256 с.
3. 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.
4. 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.