

УДК 681.324

О.В. Барабаш, В.В. Кіреєнко

*Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ*

## ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС СТРУКТУРИ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ ПОВІТРЯНОГО ПРОТИВНИКА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

*У статті наведено формалізований опис існуючої перетвореної структури системи радіолокаційної розвідки без прив'язки до географічних координат, що являє собою приведений до ієрархічного вигляду неорієнтований граф. Отримані ознаки функціональної стійкості графічним методом дозволяють визначити стан системи радіолокаційної розвідки, а саме можливість проводити оцінювання системи стосовно її функціональної стійкості. На основі отриманих даних з'являється можливість: обґрунтування вимоги до побудови систем передачі даних, рішення задачі синтезу оптимальної структури за критерієм максимуму функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови та експлуатації ліній зв'язку.*

**Ключові слова:** система радіолокаційної розвідки, імовірність зв'язності, неорієнтований граф.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні розподілені інформаційні системи (РІС), в тому числі системи передачі даних, створюються на основі принципів побудови корпоративних обчислювальних мереж, в яких на окремих віддалених об'єктах розгорнуті локальні обчислювальні мережі, які об'єднують автоматизовані робочі місця для виконання задач збору, обробки, зберігання та відображення інформації, а також для виконання розрахункових задач з прийняття рішень. Проте інформаційні технології при визначенні раціональної побудови системи радіолокаційної розвідки (далі – СРР) як основи для проведення всіх розрахунків даної складної системи практично не використовуються, а це як наслідок, спричиняє неповне використання бойових можливостей угрупованням радіотехнічних військ.

Недоліки існуючих методів і алгоритмів визначення раціональної побудови системи радіолокаційної розвідки, наявність внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів, які на етапі побудови не враховуються, але є дуже важливими, практична відсутність комп'ютеризації підтримки рішення при побудові СРР в сукупності вимагають пошуку вирішення цієї задачі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Об'єм і характер розв'язуваних СРР задач, а також ви-

моги, що висувуються до їхнього рішення, в значній мірі визначають принципи побудови адекватної СРР. Науково-обґрунтовані підходи до побудови СРР відкривають нові можливості для підвищення виконання завдань за призначенням, підвищення надійності і живучості радіотехнічних комплексів у цілому. Разом з тим, зростає необхідність підвищення показників ефективності СРР, тому що прорахунки у побудові структури СРР можуть привести до суттєвих негативних наслідків.

Аналіз літератури показав, що особливості функціонування СРР вимагають обґрунтованих підходів до підвищення ефективності. Існуючі особливості роботи СРР дозволили зробити висновок про те, що, незважаючи на діючі підходи до її побудови, досліджувані в них математичні моделі складних систем не здатні адекватно описати процес функціонування СРР.

**Формулювання мети статті.** Метою статті є оцінка існуючої побудови СРР з використанням теорії графів та подальшим оцінюванням функціональної стійкості.

### Виклад основного матеріалу дослідження

В процесі зміни структури, обумовленої виходом з ладу визначених ліній зв'язку та вузлів комутації функціонально стійка система може стати функціона-

льно нестійкою. В той же час, в процесі нарощування структури СРР або відновлення несправних елементів системи, структура може переходити із функціонально нестійкого стану в функціонально стійкий.

Наведемо ознаки (визначення) функціональної стійкості.

Мостом називається ребро зв'язного графа, з'єднуючого два підграфа, після видалення якого граф перетворюється із однокомпонентного в двокомпонентний [1]. В деяких роботах з теорії графів міст називають перешийком.

Вузлом зчленування називається така вершина зв'язного графа, після видалення якої разом з інцидентними їй ребрам граф перетворюється з однокомпонентного в двокомпонентний.

Таким чином, поточна структура перебуває на границі функціональної стійкості, якщо граф структури зв'язаний та має у своєму складі мости  $N_L \geq 1$  або вузли з'єднання  $N_V \geq 1$ :

$$\{K = 1\} \wedge \{[N_V \geq 1] \vee [N_L \geq 1]\}, \quad (1)$$

де  $K$  – число компонентів графу, а умова  $K = 1$  вказує, що граф зв'язний;  $N_L, N_V$  – число вузлів сходжень мостів графу відповідно.

Наявність в структурі моста або вузла зчленування, які з'єднують два підграфа, вказує, що всі маршрути передачі інформації з вершин одного підграфа у вершини іншого будуть включати до себе цей міст або вузол сходження. Наведене правило суттєвим чином знижує функціональну стійкість розподіленої інформаційної системи. Тому для приведення системи в функціонально стійкий стан необхідно водити в структуру резервні лінії зв'язку для того, щоб не було в структурі мостів або вузлів зчленування. При цьому будуть з'являтися декілька незалежних та альтернативних маршрутів передачі інформації.

На рис. 1 представлені елементарні структури розподілених інформаційних систем (РІС), які мають наступний опис: структура на рисунку 1(а) зв'язна, не має мостів та вузлів зчленувань, показники функціональної стійкості  $\lambda(G)=2, \chi(G)=2$ , тому функціонально стійка; структура на рисунку 1(б) є зв'язною та має вузол зчленування ( $N_V=1$ ), показники  $\lambda(G)=1, \chi(G)=1$ , тому структура перебуває на межі функціональної стійкості, оскільки зв'язна та має у своєму складі два вузли зчленування ( $N_V=2$ ) та один міст ( $N_L=1$ ); структура на рисунку 1(в) також знаходиться на межі функціональної стійкості, оскільки зв'язна та має у своєму складі два вузла зчленування ( $N_V=2$ ) та один міст ( $N_L=1$ ); структура на рисунку 1(г) є функціонально нестійкою так як незв'язана та складається з двох компонент; структура на рисунку 1(д) пов'язана, не має мостів та вузлів зчленування, має показники функціональної стійкості  $\lambda(G)=3, \chi(G)=3$ , тому структура функціонально

стійка; структура на рисунку 1(е) функціонально нестійка, так як незв'язана та складається з двох компонент.

Аналіз структур показує, що якщо система знаходиться на межі стійкості, то вона працездатна та виконує встановлений об'єм функцій. Однак у випадку хоча б однієї відмови мосту або вузлу зчленування система переходить до функціонально нестійкого стану. Результати аналізу елементарних структур відображені в таблиці 1, де  $m_v$  – число вершин графа;  $m_L$  – число ребер графа;  $\chi(G)$  – ступінь реберної зв'язності графа;  $\lambda(G)$  – ступінь вершинної зв'язності графа;  $K$  – число компонент графа;  $N_V$  – число вузлів зчленувань у графі;  $N_L$  – число мостів в графі; ФС – функціонально стійкий стан структури; НФС – не функціонально стійкий стан структури; СМФС – структура на межі функціональної стійкості.

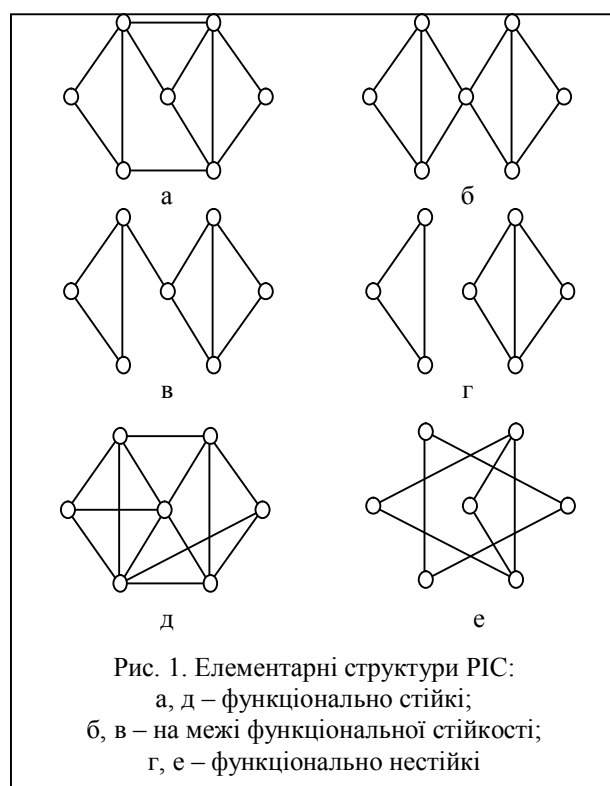


Рис. 1. Елементарні структури РІС:  
а, д – функціонально стійкі;  
б, в – на межі функціональної стійкості;  
г, е – функціонально нестійкі

Таблиця 1  
Топологічні показники елементарних структур РІС

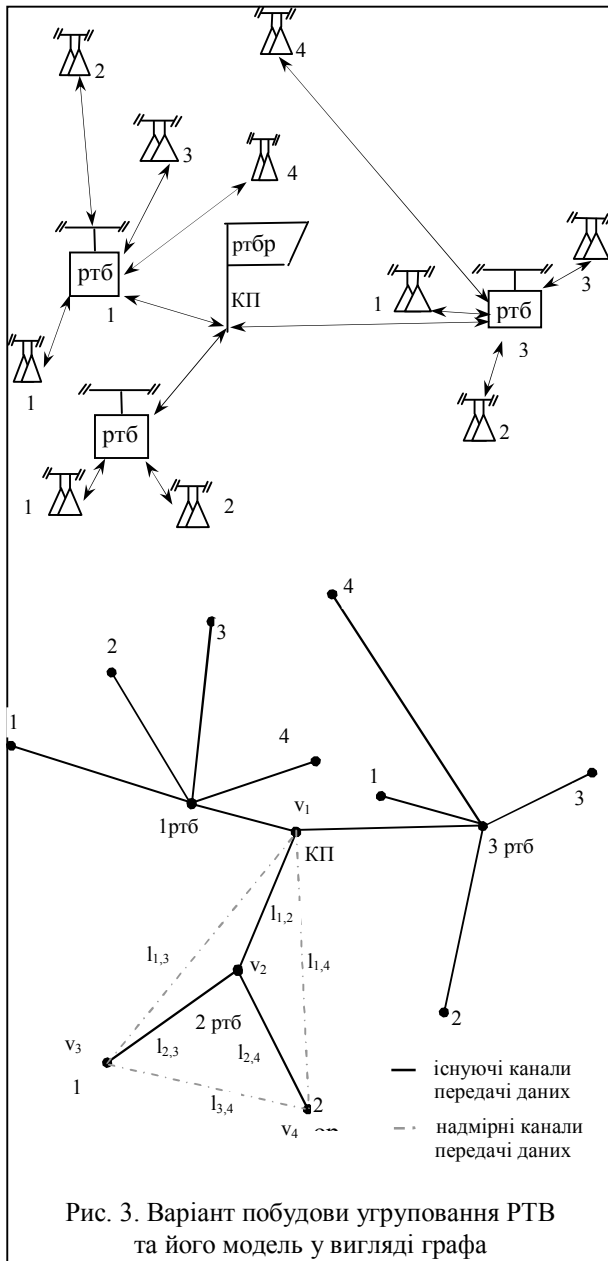
Структури	$m_v$	$m_L$	$\chi(G)$	$\lambda(G)$	$K$	$N_V$	$N_L$	ФС
рис.1а)	7	11	2	2	1	0	0	ФС
рис.1б)	7	10	1	2	1	1	0	СМФС
рис.1в)	7	9	1	1	1	2	1	СМФС
рис.1г)	7	8	0	0	2	0	0	НФС
рис.1д)	7	11	2	2	1	0	0	ФС
рис.1е)	7	8	0	0	2	0	0	НФС

З вище викладених положень теорії графів, можна стверджувати, що аналіз функціональної стійкості складних систем в тому числі СРР, доцільно здійснювати за наступними показниками:

- ступень вершинної зв'язності  $\chi(G)$ ;
- ступень реберної зв'язності  $\lambda(G)$ ;
- імовірність зв'язності структури  $P_{x,y}$ .

За відомими показниками [2] можна характеризувати функціональну стійкість СРР, запас, ступень відповідності заданим вимогам з функціональної стійкості, число відмов ліній передачі даних або вузлів комутації, яке може бути парировано за рахунок введення структурної надмірності.

На рис. 2 відображена типова побудова угруповання РТВ та її спрощена модель у вигляді неорієнтованого графа.



Найбільш прийнятним способом під час опису наведеного графа є використання теорії графів, яка викладена в [3], з якої будемо використовувати необхідні поняття. В даному випадку граф, що описує систему радіолокаційної розвідки, а саме систему

передачі даних, є неорієнтованим, тобто обмін інформацією між вершинами (ртб, орлр) здійснюється в обох напрямках.

Зауважимо, що при описі неорієнтованого ребра [4] порядок слідування індексів вершин його граничної пари довільний. Тим не менш, умовимося, що спочатку пишемо менший номер вершини, а потім більший. На даний час існує ряд методів, які використовуються для визначення показника зв'язності структури. Зупинимося на розгляді основних положень деяких методів.

**Метод аналізу простих ланцюгів графа.**

Даний метод засновано на події зв'язності  $E_{x,y}$  обраної пари вершин  $v_x$  і  $v_y$  при  $\alpha=1$  відповідає існуванню хоча б одного простого ланцюга  $\mu \in M_{x,y}$ .

Суть даного методу обчислення  $P_{x,y}$  зводиться до формування усіх можливих комбінацій з  $m_{x,y}$  простих ланцюгів (ПЛ) так, що кожна комбінація включає всі елементи графа двополюсної розподільної інформаційної системи, які входять до комбінованих простих ланцюгів, а також обчислення імовірності існування комбінацій при знаковмінному їх додаванні. Суттєвою перевагою методу є те, що нема необхідності визначати функцію зв'язності. Недоліком є його громіздкість в обчисленні, так як потрібно розглянути  $2^{m_{x,y}} - 1$  усіх можливих комбінацій із  $m_{x,y}$  простих ланцюгів.

**Метод обчислення зв'язності структури на основі аналізу простих розрізів графа.**

Даний метод ґрунтується на приведенні структури до дводольного графа та дозволяє розрахувати імовірність зв'язності  $P_{x,y}$  події незв'язності вершин  $v_x$  та  $v_y$ . Цим він принципово відрізняється від методів аналізу простих ланцюгів. В основу метода дводольних графів закладено використання властивостей стягнутого дводольного графа [5], конструкція якого дозволяє відносно просто описати подію незв'язності вершин  $v_x$  та  $v_y$ , тоді як простий ланцюг відображає подію зв'язності цих же вершин.

Слід відмітити, що переваги та недоліки будь-якого методу розглядаються в кожному конкретному випадку.

Наведемо приклад розрахунку імовірності зв'язності  $P_{x,y}$  для структури радіотехнічного батальйону методом прямого перебору простих ланцюгів. В якості прикладу оберемо елементарну частину графа СРР, зображеного на рис. 2 та наведеного окремо на рис. 3.

Між  $v_1$  та  $v_4$  можна сформувати п'ять простих ланцюгів:  $M_{1,4} = \{\mu_1 = \{7\}, \mu_2 = \{6 \cdot 2 \cdot 8\}, \mu_3 = \{5 \cdot 3 \cdot 10\}, \mu_4 = \{6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10\}, \mu_5 = \{5 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 8\}\}$ .

Якщо  $\mu_1$  складає підмножину ребер безпосереднього зв'язку, тоді подія  $E_{xy}$  існування між вершинами  $v_1$  та  $v_4$  хоча б одного простого ланцюга буде описуватися аналітичним виразом виду (без врахування ребер безпосереднього зв'язку  $\mu_1$ ):

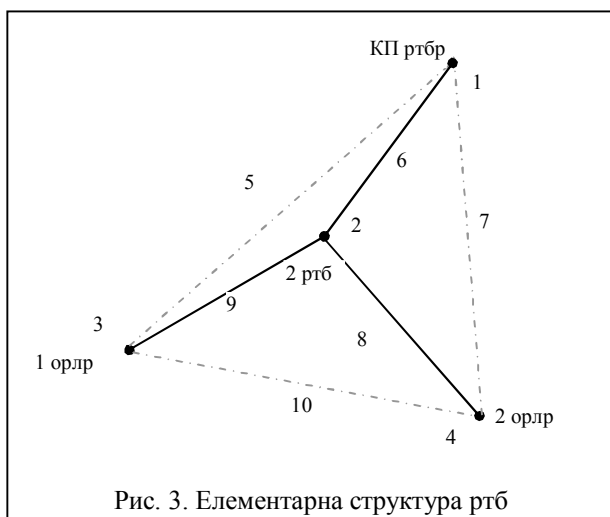


Рис. 3. Елементарна структура ртб

$$E_{1,4} = (\mu_2 + \mu_3 + \mu_4 + \mu_5) - (\mu_2 * \mu_3 + \mu_2 * \mu_4 + \mu_2 * \mu_5 + \mu_3 * \mu_4 + \mu_3 * \mu_5 + \mu_4 * \mu_5) + (\mu_2 * \mu_3 * \mu_4 + \mu_2 * \mu_3 * \mu_5 + \mu_2 * \mu_4 * \mu_5 + \mu_3 * \mu_4 * \mu_5) - (\mu_2 * \mu_3 * \mu_4 * \mu_5) \quad (2)$$

Імовірність  $P_{1,4}$  існування хоча б одного простого ланцюга між вершинами  $v_1$  та  $v_4$  з урахуванням (2) (замість  $p_i$ , використовується і):

$$P_{1,4} = 1 - \bar{7} \cdot \{1 - [(6 \cdot 2 \cdot 8 + 5 \cdot 3 \cdot 10 + 6 \cdot 3 \cdot 10 + 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10) - (6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 10 + 6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10 + 6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 8 + 5 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10 + 5 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 8 + 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 8) + (6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10 + 6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 8 + 6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 8 + 5 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10) - (6 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 8)]\}. \quad (3)$$

Якщо  $p_i=0,8$  по усім і то імовірність зв'язності вершин  $v_1$  і  $v_4$ :

$$P_{1,4} = 1 - q \cdot (1 - 2p^3 - 2p^5 + 5p^6 - 2p^7) = 0,958. \quad (4)$$

Таким чином, параметр графа  $\lambda(G)$  характеризує верхню межу допустимого числа відмов ЛЗ.

### ФОРМАЛИЗИРОВАННОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ ВОЗДУШНОГО ПРОТИВНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ

О.В. Барабаш, В.В. Киреенко

В статье приведено формализованное описание существующей преобразованной структуры системы радиолокационной разведки без привязки к географическим координатам, что является собой приведенный к иерархическому виду неориентируемый граф. Полученные признаки функциональной стойкости графическим методом позволяют определить состояние системы радиолокационной разведки, а именно возможность проводить оценивание системы относительно её функциональной устойчивости. На основе полученных данных появляется возможность: обоснования требований к построению систем передачи данных, решения задачи синтеза оптимальной структуры по критерию максимума функциональной устойчивости с ограничением на стоимость построения и эксплуатации линий связи.

**Ключевые слова:** система радиолокационной разведки, вероятность связности, неориентируемый граф.

### DESCRIPTION OF SYSTEM STRUCTURE OF RADAR RECONNAISSANCE OF AIR OPPONENT WITH FORMALIZED USING OF GRAPHS THEORY

O.V. Barabash, V.V. Kireenko

In the article the formalized description of existent regenerate radar reconnaissance's systems structure is resulted without attachment to the geographical co-ordinates, that shows by itself a non-orientable graph is resulted to the hierarchical kind. The signs of functional firmness are got allow to define the state of the radar reconnaissance by graphic method, namely possibility to conduct the evaluation of the system in relation to it functional firmness. Possibility appears on the basis of findings: ground of requirement to the construction of the systems transmissions given, decisions of task of synthesis of optimum structure after the criterion of a maximum of functional firmness with a limit on the cost of construction and exploitation of signals lines.

**Keywords:** system of radar reconnaissance, probability of compendency, non-orientable graph.

В якості числового показника функціональної стійкості структури обрана імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$  – імовірність того, що повідомлення буде доставлено від вузла і до вузла j за час не більше t. Таким чином, показник  $P_{ij}(t)$  є основним показником, який характеризує функціональну стійкість СРР.

### Висновки

Таким чином, найбільш прийнятним способом формального опису структури системи радіолокаційної розвідки є застосування теорії графів. Зазначені обставини сприяють проведенню аналізу функціональної стійкості СРР, який доцільно здійснювати за наступними показниками: ступеню вершинної зв'язності  $\chi(G)$ ; ступеню реберної зв'язності  $\lambda(G)$  та імовірність зв'язності структури  $P_{x,y}$ .

За знайденим показникам можна характеризувати функціональну стійкість, запас функціональної стійкості, ступінь відповідності заданим вимогам по функціональній стійкості, число відмов ліній передачі даних чи вузлів комутації.

### Список літератури

1. Дудник Б.Я. Надежность и живучесть систем связи / Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко, В.К. Орлов и др.; Под ред. Б.Я. Дудника. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
2. Надійність техніки. Терміни та визначення. ДСТУ 2860-94. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.
3. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.
4. Уилсон Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 208 с.
5. Харитонова Е.В. Графы и сети / Е.В. Харитонова. – М.: Наука, 2006. – 92 с.

Надійшла до редколегії 28.01.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.