

## Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем

Олег Машков<sup>1</sup>, Олег Барабаш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> д. т. н., професор, Вища атестаційна комісія України, вул. Хрещатик, 34, Київ, 01001, e-mail: omashkov@i.com.ua  
<sup>2</sup> к. т. н., доцент, Інститут авіаційно-космічних досліджень ім. І. І. Сікорського, Повітрофлотський пр-т, 28, Київ, 01001, e-mail: olegb@i.com.ua

*Досліджується можливість кількісної оцінки функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем. Вводяться поняття ознаки, критерію і запасу функціональної стійкості, які ґрунтуються на визначенні параметрів графа, що описує структуру досліджуваної системи такого класу.*

**Ключові слова:** функціональна стійкість, інформаційно-керуюча система.

**Вступ.** Проблема аналітичного оцінювання функціональної стійкості. Об'єктом дослідження є розподілена інформаційно-керуюча система (РІКС), яка складається з розподілених у просторі за територіальною ознакою засобів автоматизованої обробки інформації для розв'язування задач накопичування, обробки, зберігання та передачі інформації. Така система належить до класу складних організаційних систем і побудована на основі технології корпоративних обчислювальних мереж. Вона складається з вузлів комутації і каналів (ліній) зв'язку між окремими елементами системи. Головною вимогою, що висувається до РІКС, є виконання основної функції — забезпечення абонентів корпоративної мережі потенційною можливістю доступу до розподілених інформаційних ресурсів, об'єднаних у єдиний комплекс. Всі інші вимоги, наприклад — продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, живучість, розширюваність і обсяг структури — залежать від якості виконання цієї основної задачі [1]. У сучасних умовах на РІКС негативно впливають внутрішні (відмови, збої, помилки корпоративних абонентів) і зовнішні (активний або пасивний вплив зовнішнього середовища) чинники. Тому проблема забезпечення можливості безпомилкового функціонування РІКС, за умови можливої дії негативних чинників, є актуальною і досі аналітично не сформульована.

*Аналіз досліджень і публікацій щодо забезпечення стійкості функціонування складних систем.* Вирішенню проблеми забезпечення стійкості функціонування складних технічних систем присвячено низку наукових праць [1-4]. Однак, на наш погляд, основна увага в них зосереджена на розв'язанні часткових задач, а саме — побудові резервованих інформаційно-керуючих систем, відмовостійких керуючих обчислювальних систем, адаптивних систем управління.

У роботі [5] уперше введено, а в [6] розвинуто поняття функціональної стійкості складних динамічних об'єктів, що описуються системою диференціальних рівнянь. Запропонований підхід базується на принципах комплексного забезпечення спостережуваності, керованості, ідентифікованості динамічних об'єктів. Однак для РІКС такий апарат неприйнятний. У теорії надійності [2] визначення показників надійності опирається, насамперед, на приведенні структури системи до відповідної схеми у вигляді послідовних і паралельних з'єднань модифікованих елементів. Такий підхід також не можна застосовувати для складних організаційних систем з великою кількістю перехресних (постійних і випадкових) зв'язків і врахуванням взаємовпливу одних елементів на інші, тобто до систем з випадковими структурою та зв'язками.

*Метою цієї роботи є виклад запропонованого авторами математичного апарату кількісної оцінки функціональної стійкості динамічно змінюваних структур розподілених інформаційно-керуючих систем.*

## 1. Критерії та показники функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем

Під функціональною стійкістю будемо розуміти здатність системи виконувати свої функції впродовж заданого інтервалу часу за умови впливу на неї потоку експлуатаційних відмов, навмисних пошкоджень, втручання в обмін і обробку інформації, а також у разі помилок обслуговуючого персоналу [5, 7].

Функціональна стійкість складної технічної системи поєднує властивості надійності, відмовостійкості, живучості і характеризує здатність об'єкта до відновлення працездатного стану за рахунок використання надмірності.

*Математична модель структури РІКС має вигляд неорієнтованого графа  $G(V, E)$ ,  $v_i \in V$ ,  $e_{ij} \in E$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ , який описується матрицею суміжності*

$$A = \| a_{ij} \|, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{їдє } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{їдє } e_{ij} \notin E. \end{cases} \quad (1)$$

Множині вершин  $V$  відповідає множина вузлів комутації розмірності  $n$ , а множині ребер  $E$  — множина ліній зв'язку між вузлами комутації. Приймаємо, що РІКС буде виконувати основну функцію — обмін даними, якщо між будь-якою парою вузлів комутації існує хоча б один маршрут передачі інформації [4]. Таким чином, вимога зв'язності графа дає підставу кількісно оцінити функціональну стійкість розподілених інформаційно-керуючих систем. У цій роботі не будемо розглядати якість виконання основних функцій, яка описується часом затримки повідомлення при пересиланні. Також приймаємо, що канали зв'язку мають пропускну здатність, яка дозволяє передати довільно великий інформаційний потік.

У технічній кібернетиці, а саме в теорії автоматичного керування [9], побудовано класичну теорію стійкості динамічних систем, засновником якої є Ляпу-

нов А. М. У згаданій теорії можна оцінити стійкість, не розв'язуючи системи диференціальних рівнянь, що описують об'єкт, а використовуючи прості ознаки, умови і критерії стійкості, розроблені Вишеградським І., Гурвицем А., Михайловим А., Найквістом Х. та ін. [9]. За аналогією з класичною теорією стійкості, пропонується оцінювати функціональну стійкість за параметрами графа, що описує структуру РІКС. На основі зовнішнього вигляду графа і його параметрів можна визначити якою буде система: функціонально стійкою, нестійкою або нейтральною. Для цього пропонується застосовувати наступні ознаки:

*Ознака функціональної стійкості структури.* Структура РІКС є функціонально стійкою, якщо граф структури є однокомпонентним та не має мостів і вузлів з'єднання. Зворотнє визначення дозволяє окреслити функціональну нестійкість структури.

*Ознака функціональної нестійкості структури.* Структура РІКС є функціонально нестійкою, якщо її граф є багатокомпонентним і незв'язаним.

Таким чином, на основі аналізу зовнішнього вигляду графа, а саме за кількістю компонент, наявністю мостів і вузлів з'єднання графа, можна зробити висновок щодо функціональної стійкості структури, тобто закладеної в ній здатності уникати відмов й пошкоджень. Однак для сильно розгалужених і багатoverшинних графів провести оцінку на основі зовнішнього вигляду досить складно. Тому для кількісної оцінки ступеня функціональної стійкості введемо в розгляд показники функціональної стійкості структури:

1. Показник вершинної зв'язності  $\chi(G)$  — це найменша кількість вершин, видалення яких разом з інцидентними їм ребрами призводить до утворення незв'язного чи одновершинного графа [8].
2. Показник реберної зв'язності  $\lambda(G)$  — це найменша кількість ребер, видалення яких призводить до утворення незв'язного графа [8].
3. Імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$  — це імовірність того, що повідомлення з вузла  $i$  у вузол  $j$  буде передано за час, не більший від  $t$ .

Аналіз цих показників дозволяє виділити такі їх особливості:  
— вершинна і реберна зв'язності характеризують тільки поточну структуру, незалежно від надійності вузлів комутації чи ліній зв'язку;  
— показники  $\chi(G)$  і  $\lambda(G)$  набувають цілих значень і пов'язані співвідношенням [8]

$$\chi(G) \leq \lambda(G) \leq \min_{v_i \in V} \{\deg(v_i)\}; \quad (2)$$

— імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$  дозволяє враховувати надійність комутаційного обладнання, тип фізичного каналу передачі інформації, наявність резервних каналів і маршрутів, а також зв'язність розподіленої структури. Разом з тим, обчислення значень  $P_{ij}(t)$  є складною і громіздкою задачею;

— імовірність зв'язності характеризує зв'язність тільки однієї пари вершин. Для того, щоб охарактеризувати зв'язність усіх пар вершин необхідно оперувати з матрицею ймовірностей зв'язності  $\mathbf{P} = \|P_{ij}\|, i, j = \overline{1, n}$ .

На основі запропонованих ознак і показників можна розробити *критерії функціональної стійкості структури*:

1. *Структурний критерій*. Структура буде функціонально стійкою, якщо значення показників вершинної та реберної зв'язностей задовольняють умові

$$\chi(G) \geq 2 \cup \lambda(G) \geq 2, \quad (3)$$

тобто, якщо після видалення однієї з вершин (одного з ребер) граф не перетвориться у незв'язний або одновіршинний і у ньому існує хоча б один маршрут між кожною парою решти вершин графа.

2. *Імовірнісний критерій*. Структура буде функціонально стійкою, якщо ймовірність зв'язності кожної пари вершин буде не менша від заданої

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^3, i \neq j, i, j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

де  $n$  — кількість вершин графа  $G(V, E)$ .

Структурний критерій дозволяє порівнювати системи з різними структурами, а також оцінювати структуру системи на етапі її синтезу, уникаючи при цьому досить складних обчислень. Імовірнісний критерій дає можливість враховувати технічні особливості каналів зв'язку, а також порівнювати системи, які мають однакову топологію. Таким чином, сформульовані критерії дозволяють на основі точних розрахунків визначити функціональну стійкість поточної структури РІКС.

## 2. Границя й області функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем

На границі областей стійкості і нестійкості існує специфічна область, у якій система не є функціонально стійкою і, водночас, не є функціонально нестійкою. Таку область, за аналогією з теорією стійкості динамічних систем [9], будемо називати границею функціональної стійкості структури.

*Ознака границі функціональної стійкості*. Поточна структура перебуває на границі функціональної стійкості, якщо граф структури зв'язний, має у своєму складі мости ( $N_E \geq 1$ ) чи вузли з'єднання ( $N_V \geq 1$ )

$$\{K = 1\} \wedge [\{N_V \geq 1\} \vee \{N_E \geq 1\}], \quad (5)$$

де  $K$  — кількість компонент графа, а умова  $K = 1$  означає, що граф зв'язний,  $N_V(N_E)$  — кількість вузлів з'єднання (мостів) графа.

Мостом називається ребро зв'язного графа, що з'єднує два підграфи, після видалення якого граф перетворюється з однокомпонентного у двокомпонентний [8]. У деяких роботах з теорії графів міст називають перешийком. Вузлом з'єднання

називається така вершина зв'язного графа, після видалення якої разом з інцидентними їй ребрами граф перетворюється з однокомпонентного у двоконпонентний [8].

Наявність у структурі моста чи вузла, що з'єднують два підграфи, означає, що всі маршрути передачі інформації з вершин одного підграфа у вершини іншого містять цей міст чи вузол з'єднання. Це істотно знижує структурну надійність і функціональну стійкість РІКС. Тому для забезпечення функціонально стійкого стану системи, для уникнення мостів чи вузлів з'єднання, доцільно вводити в її структуру резервні лінії зв'язку. При цьому виникає декілька незалежних і альтернативних маршрутів передачі інформації.

Аналіз структур показує, що за перебування системи на границі стійкості, вона є працездатною і виконує необхідний обсяг функцій. Однак, у разі відмови хоча б одного моста чи вузла з'єднання, система переходить у нестійкий стан.

Області функціональної стійкості і нестійкості можна зобразити в декартовому просторі в координатах  $\lambda(G)$ ,  $\chi(G)$  (рис. 1). Точка на площині, що характеризує стан системи, визначається значеннями параметрів  $\lambda(G)$ ,  $\chi(G)$  графа структури. За належністю точки тій чи іншій області можна оцінювати функціональну стійкість чи нестійкість системи.

У графічному представленні границею функціональної стійкості системи буде геометричне місце точок, що лежать на двох прямих  $\chi(G) = 1$  та  $\lambda(G) = \chi(G)$  (див. рис. 1).



Рис. 1. Геометрична інтерпретація областей функціональної стійкості і нестійкості

### 3. Запас функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем

Введені поняття дозволяють оцінити як далеко стан поточної структури перебуває від границі стійкості, тобто який запас її функціональної стійкості. Цей запас можна визначити також у сенсі зв'язності структури. У такому разі він буде характеризуватися кількістю відмов (розривом ребер чи виходом з ладу вершин), що можуть спричинити перехід структури до нестійкого стану.

Запас функціональної стійкості кількісно можна визначити з використанням наступних показників:

1. Реберний запас стійкості — значення  $Z_E$ , яке дорівнює відстані від точки з координатами  $(\lambda(G), \chi(G))$  в області функціональної стійкості до прямої  $\lambda(G) = 1$

$$Z_L = \lambda(G) - 1. \quad (6)$$

2. Вершинний запас стійкості — значення  $Z_V$ , яке дорівнює відстані від точки з координатами  $(\lambda(G), \chi(G))$  в області функціональної стійкості до прямої  $\chi(G) = 1$

$$Z_V = \chi(G) - 1. \quad (7)$$

Можна також обчислювати запас функціональної стійкості, як різницю між поточним  $P_{ij}$  і заданим  $P_{ij}^s$  значеннями ймовірності зв'язності. Очевидно, що в цьому випадку запас буде визначатися квадратною матрицею

$$\mathbf{Z}_P = \|z_{ij}\|, \quad z_{ij} = P_{ij} - P_{ij}^s. \quad (8)$$

Таким чином, після знаходження запропонованих параметрів з використанням ознак функціональної стійкості, можна визначити чи система перебуває в функціонально стійкому чи нестійкому станах. Запас функціональної стійкості, який визначає ступінь цієї стійкості, можна знайти як аналітично на основі запропонованих формул, так і графічно (див. рис. 1). Проведені дослідження дають змогу ще на етапі проектування обґрунтовувати вимоги до РІКС, розв'язувати задачі синтезу оптимальної структури за критерієм максимуму функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови та експлуатації ліній зв'язку, а також обґрунтовувати доцільність нарощування структури системи в процесі експлуатації.

**Висновки.** У статті запропоновано ознаки і показники функціональної стійкості структури розподіленої інформаційно-керуючої системи. Уперше введено поняття границі і запасу функціональної стійкості. Розроблено методи кількісного оцінювання функціональної стійкості з використанням введених показників.

Перевагами такого підходу є можливість кількісного оцінювання функціональної стійкості поточної структури РІКС, виходячи з простих зовнішніх ознак. На основі таких оцінок можна давати рекомендації щодо нарощування структури чи складати обґрунтовані вимоги до системи, що буде проектуватися.

## Література

- [1] Введение в теорию живучести вычислительных систем / Додонов А.Г., Кузнецов М.Г., Горбачик Е.С. Отв. ред. Гуляев В.А. — К.: Наук. думка, 1990. — 184 с.
- [2] Надежность и живучесть систем связи / Дудник Б.Я., Овчаренко В.Ф. и др. Под ред. Дудника Б.Я. — М.: Радио и связь, 1984. — 216 с.
- [3] Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. — К.: Техніка, 1986. — 168 с.
- [4] Королев А.В., Кучук Г.А., Пашиною А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. — Харьков: ХВУ, 2003. — 224 с.
- [5] Артюшин Л.М., Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам. — К.: КВВАИУ, 1991. — 89 с.
- [6] Машков О.А., Машков В.А. Принципы функциональной устойчивости сложных систем // Наука и оборона. — 1995. — № 2. — С. 37-44.
- [7] Барабаш О.В., Кравченко Ю.В. Функціональна стійкість — властивість складних технічних систем. Зб. наук. пр. НАОУ. Бюл. № 40. — К.: НАОУ, 2002. — С. 225-229.
- [8] Уилсон Р. Введение в теорию графов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 208 с.
- [9] Артюшин Л.М., Машков О.В., Сівов М.С. Теорія автоматичного керування. — К.: КІВПС, 2000. — 320 с.

## The Estimation of Functional Stability for the Distributed Informational Control Systems

Oleg Mashkov, Oleg Barabash

*The possibility of quantitative evaluation of functional stability for distributed informational control systems is investigated. Concepts of the attribute, criterion and margin of functional stability, based on parameter determination of the system structure graph are introduced.*

## Оценка функциональной устойчивости распределенных информационно-управляющих систем

Олег Машков, Олег Барабаш

*Исследуется возможность количественной оценки функциональной устойчивости распределенных информационно-управляющих систем. Введены понятия признака, критерия и запаса функциональной устойчивости, основанные на определении параметров графа, описывающего структуру исследуемой системы указанного класса.*

Отримано 10.10.04