

ПОНЯТІЙНИЙ АПАРАТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОГЕННЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Машков О. А., Печений В. Л., Присяжний В. І., Оводенко Т. С.
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35м. Київ, 03035
mashkov_oleg_52@ukr.net

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. У статті запропоновано ознаки і показники функціональної стійкості структури екологічного комплексу. Обґрунтовано критерії та показники функціональної стійкості об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів. Розглянуто поняття запасу функціональної стійкості. Введені поняття дозволяють оцінити як далеко стан екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) перебуває від границі стійкості, тобто який є 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 комплексу до нестійкого стану. Розроблено методи кількісного оцінювання функціональної стійкості з використанням введених показників. Перевагами такого підходу є можливість кількісного оцінювання функціональної стійкості поточної структури екологічного комплексу, виходячи з зовнішніх ознак. На основі таких оцінок можна давати рекомендації щодо нарощування структури чи складати обґрунтовані вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи

підтримки прийняття управлінських екологічних рішень. Проведені дослідження дають змогу ще на етапі проєктування обґрунтовувати вимоги до системи управління екологічною безпекою об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів, розв'язувати задачі синтезу оптимальної структури екологічного екомплєксу 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.

Ключові слова: екологічний комплекс, запас функціональної стійкості, критерій і запас функціональної стійкості, об'єкти критичної інфраструктури, система підтримки прийняття управлінських екологічних рішень, система управління екологічною безпекою, техногенно небезпечні об'єкти, функціональна стійкість.

Conceptual apparatus of functional stability of critical infrastructure objects and technogenic hazardous objects. *Mashkov O. A. Pechenyi V. L. Prysiazhnyi V. I. Ovodenko T.*

The possibility of quantitative assessment of the functional stability of distributed information and control systems is investigated. The concepts of a feature, criterion and margin of functional stability are introduced, which are based on determining the parameters of the graph describing the structure of the studied system of this class. The article proposes features and indicators of the functional stability of

the structure of the ecological complex. The criteria and indicators of the functional stability of critical infrastructure objects and technogenically hazardous objects are substantiated. The concept of the margin of functional stability is considered. The introduced concepts allow us to assess how far the state of the ecological complex (critical infrastructure objects and technogenically hazardous objects) is from the stability limit, that is, what is the margin of its functional stability. This margin can also be defined in terms of the connectivity of the structure. In this case, it will be characterized by the number of failures (breakage of edges or failure of vertices), which can cause the transition of the structure of the complex to an unstable state. Methods for quantitative assessment of functional stability using the introduced indicators have been developed. The advantages of this approach are the possibility of quantitative assessment of the functional stability of the current structure of the ecological complex, based on external signs. Based on such assessments, it is possible to give recommendations for building up the structure or to formulate justified requirements for the environmental safety management system and the system for supporting the adoption of managerial environmental decisions. The conducted studies make it possible to substantiate the requirements for the environmental safety management system of critical infrastructure facilities and technogenically hazardous facilities at the design stage, to solve the problems of synthesizing the optimal structure of the ecological ecomplex according to the criterion of maximum functional stability with a restriction on the cost of construction and operation of communication lines, and also to justify the feasibility of building up the structure of the system during operation.

Keywords: ecological complex, functional stability reserve, criterion and functional stability reserve, critical infrastructure facilities, environmental management decision-making support system, environmental safety management system, technogenically hazardous facilities, functional stability.

Постановка проблеми

Проблемна ситуація, що призвела до виникнення наукового напрямку забезпечення функціональної стійкості, пов'язана з розробленням

наприкінці ХХ століття складних автономних техногенних систем, що функціонують в екстремальних умовах (техногенне небезпечні об'єкти, об'єкти критичної інфраструктури). Їхня висока вартість та потенційна небезпека зажадали забезпечення відповідного рівня надійності та безпеки застосування. При цьому традиційні методи, що ґрунтуються на багаторазовому резервуванні, введенні систем вбудованого контролю та елементів з підвищеним рівнем надійності, погіршували техніко-економічні характеристики проєктованих систем, не завжди призводять до необхідного зменшення ймовірності виникнення небезпечних ситуацій. Необхідність запровадження додаткової апаратної надмірності задля забезпечення надійності системи стало важливим обмеженням цього підходу. Тому було запропоновано розглядати позаштатні стани системи, викликані відмовами, як допустимі, і їм формувати адекватне (функціонально стійке) управління, спрямоване на парирування наслідків відмов та підтримку виконання функцій системи. За рахунок цього управління забезпечується перерозподіл ресурсів системи задля досягнення головної мети, навіть за умов відмов. Вперше поняття «функціональна стійкість», його визначення та принципові засади забезпечення функціональної стійкості були наведені у публікаціях, присвячених вирішенню конкретних завдань управління складними автономними динамічними об'єктами [1–3]. Було встановлено, що важливою умовою забезпечення цієї якості є можливість перерозподілу наявних ресурсів усередині системи (комплексу).

Проблема аналітичного оцінювання функціональної стійкості екологічної системи виникає при вирішенні завдання забезпечення екологічної безпеки регіонів та об'єктів критичної інфраструктури. При цьому об'єктом дослідження є об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти. Сукупність цих об'єктів пропонується розглядати як розподілені інформаційно-керуючі системи (РІКС), які містять розподілені у просторі за територіальною ознакою засоби автоматизованої оброблення інформації для розв'язування задач накопичування, оброблення, зберігання та передачі інформації та енергії. Такі системи належать до класу складних організаційних систем і побудовані на основі

технології корпоративних обчислювальних мереж прийняття управлінських екологічних рішень. 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 та енергетичних ресурсів, об'єднаних у єдиний комплекс.

Всі інші вимоги, наприклад – ефективність, продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, живучість, розширюваність і обсяг структури – залежать від якості виконання цієї основної задачі [4]. У сучасних умовах на РІКС негативно впливають внутрішні (відмови, перебої, помилки персоналу та працівників) і зовнішні (активний або пасивний вплив зовнішнього середовища) чинники. Тому проблема забезпечення можливості безпечного (безпомилкового функціонування РІКС), за умови можливої дії негативних чинників, є актуальною і досі аналітично не сформульована.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

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 – побутових резервованих інформаційно–керуючих систем, відмовостійких керуючих обчислювальних систем, адаптивних систем управління.

У роботі [3] уперше введено, а в [6, 7] розкрито 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 визначення показників надійності опирається, насамперед, на приведенні структури системи до відповідної схеми у вигляді послідовних і паралельних з'єднань модифікованих елемен-

тів. Такий підхід також не можна застосовувати для складних організаційних систем із великою кількістю перехресних (постійних і випадкових) зв'язків і врахуванням взаємовпливу одних елементів на інші, тобто до систем із випадковими структурою та зв'язками [5].

Метою цієї роботи є виклад запропонованого авторами математичного апарату кількісної оцінки функціональної стійкості динамічно змінюваних структур об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів.

Результати досліджень

У традиційних системах автоматичного управління автономними об'єктами, розділених на окремі канали у складі датчиків, обчислювачів та виконавчих механізмів, ресурси (енергетичні, обчислювальні, інформаційні), що виділяються на керування, жорстко закріплені між відповідними каналами. У цьому неможливість перерозподілу ресурсів між каналами обмежує можливість формування функціонально стійкого управління.

Технологічною основою забезпечення функціональної стійкості стало створення бортових інформаційно–керівних комплексів, які дозволили комплексувати ресурси системи та здійснювати їх перерозподіл.

Тільки комплексування всіх каналів систем автоматичного управління в єдиний інформаційно–керуючий комплекс, де інформаційно–вимірювальна підсистема включатиме всі джерела інформації, пристрої перекодування та сполучення, обчислювальна система – усі обчислювачі, а енергетична підсистема – усі виконавчі механізми та джерела енергії дозволить забезпечити її функціональну стійкість.

Слід враховувати, що можливість комплексного використання ресурсів та забезпечення функціональної стійкості систем обмежується умовами стійкості динамічної системи, її керованості та спостережуваності за Калманом.

Натепер досить повне дослідження умов забезпечення функціональної стійкості проведено лише для лінійних нестационарних стаціонарних моделей динамічних систем.

Критерії та показники функціональної стійкості об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів

Під функціональною стійкістю будемо розуміти здатність об'єктів виконувати свої функції упродовж заданого інтервалу часу за умови низки експлуатаційних відмов, навмисних ушкоджень, втручання в обмін і оброблення інформації та енергії, а також у разі помилок обслуговуючого персоналу [5, 7].

Функціональна стійкість складного екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) поєднує властивості надійності, відмовостійкості, живучості і характеризує здатність екологічного комплексу до відновлення працездатного стану коштом використання надмірності ресурсів.

Математична модель структури екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) має вигляд неорієнтованого графа $G(V, E)$, $v_i \in V$, $e_{ij} \in E$, $i, j = 1, \dots, n$, який описується матрицею суміжності

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

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. Так, вимога зв'язності графа дає підставу кількісно оцінити функціональну стійкість розподілених інформаційно-керуючих систем. У цій роботі не розглядається якість виконання основних функцій, яка описується часом затримки повідомлення при пересиланні. Також вважається, що канали зв'язку мають пропускну здатність, яка дозволяє передати доволі великий інформаційний потік.

У технічній кібернетиці, а саме в теорії автоматичного керування, побудовано класичну теорію стійкості динамічних систем, засновником якої є Ляпунов А. М.. У згаданій теорії можна оцінити стійкість, не розв'язуючи систему диференціальних рівнянь, що описують об'єкт, а використовуючи прості ознаки, умови і критерії стійкості, розроблені Вишеградським І., Гурвицем

А., Михайловим А., Найквістом Х., та інші. [3]. За аналогією з класичною теорією стійкості, пропонується оцінювати функціональну стійкість за параметрами графа, що описує структуру екологічного комплексу. На основі зовнішнього вигляду графа і його параметрів можна визначити, чи буде система функціонально стійкою, нестійкою або нейтральною.

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

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

Відтак, 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 ушкоджень. Однак для сильно розгалужених і багатoverшинних графів провести оцінку на основі зовнішнього вигляду складно. Тому для кількісної оцінки ступеня функціональної стійкості введено в розгляд *показники функціональної стійкості структури екологічного комплексу*:

1. *Показник вершинної зв'язності* $\chi(G)$ – це найменша кількість вершин, видалення яких разом з інцидентними їм ребрами призводить до незв'язного чи одновершинного графа.

2. *Показник реберної зв'язності* $\lambda(G)$ – це найменша кількість ребер, видалення яких призводить до незв'язного графа.

3. *Імовірність зв'язності* $P_{ij}(t)$ – це імовірність того, що повідомлення з вузла i у вузол j буде передано за час не більший 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

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

– 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 $P = \|P_{ij}\|$, $i, j = 1, \dots, n$.

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

1. Структурний критерій. Структура екологічного комплексу буде функціонально стійкою, якщо значення вершинної і реберної зв'язностей справджують умову

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

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

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

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

Сформульовані критерії дозволяють на основі точних розрахунків визначити функціональну стійкість поточної структури екологічного комплексу.

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 [3], називається 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. У деяких роботах з теорії графів мост називають перешийком.

Вузлом з'єднання називається така вершина зв'язного графа, після видалення якої разом з інцидентними їй ребрами граф перетворюється з однокомпонентного у двокомпонентний [3].

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 мост чи вузол з'єднання. Це істотно знижує структурну надійність і функціональну стійкість РІКС.

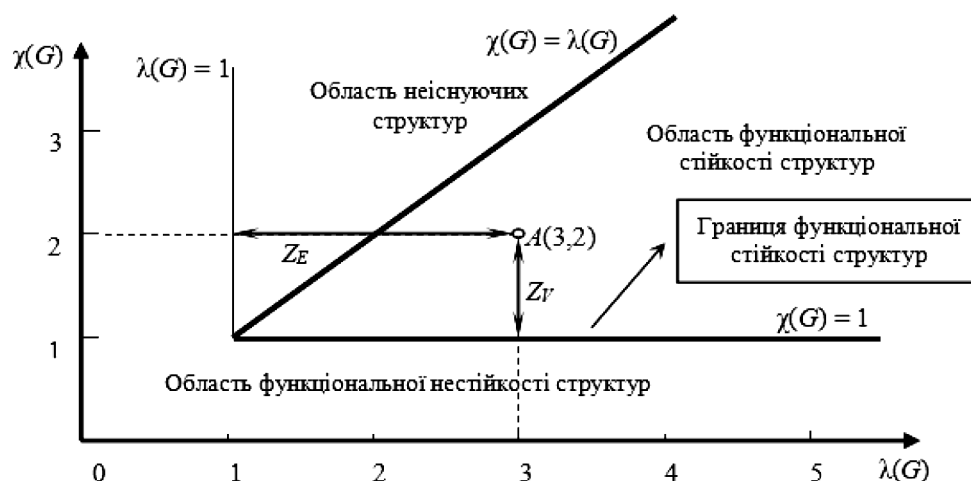


Рис. 1. Геометрична інтерпретація областей функціональної стійкості і нестійкості

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 екологічного комплексу буде геометричне місце точок, що лежать на двох прямих $\chi(G) = 1$ та $\lambda(G) = \chi(G)$ (рис. 1).

Запас функціональної стійкості екологічного комплексу

Введені поняття дозволяють оцінити як далеко стан екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенне небезпечні об'єкти) 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 комплексу до нестійкого стану.

Запас функціональної стійкості екологічного комплексу кількісно можна визначити з використанням наступних показників:

1. *Реберний запас стійкості* – значення Z_E , яке дорівнює відстані від точки з координатами $(\chi(G), \lambda(G))$ 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

$(\chi(G), \lambda(G))$ 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}^c значеннями ймовірності зв'язності. Очевидно, що в цьому випадку запас буде визначатися квадратною матрицею

$$Z_P = \left\| z_{ij} \right\|, \quad z_{ij} = P_{ij} - P_{ij}^c. \quad (8)$$

У такий спосіб, після знаходження запропонованих параметрів з використанням ознак функціональної стійкості, можна визначити чи перебуває екологічний комплекс у 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 системи управління екологічною безпекою об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів, розв'язувати задачі синтезу оптимальної структури екологічного комплексу 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 екологічного комплексу. Уперше введено поняття границі і запасу функціональної стійкості екологічного комплексу. 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 управління екологічною безпекою та системи підтримки прийняття управлінських екологічних рішень.

Список використаних джерел

1. Nils J. Nilsson . The Quest for Artificial Intelligence. – 1. – Cambridge University Press, 2019. – 578 с. – ISBN 978–0521116398 .
2. Stuart J. Russell, Peter Norvig . Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 3. – Pearson, 2015. – ISBN 978–9332543515.
3. Барабаш О. В., Козелков С. В., Машков О. А. Понятійний апарат функціональної стійкості розподілених інформаційно–керуючих систем // Збірник наукових праць НЦ ВПС ЗС України.– Вип.№7, 2005. – С. 87 – 95.
4. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Оводенко Т. С., Печений В. Л. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень в галузі екологічної безпеки / Екологічні науки: науково–практичний журнал. К.: ДЕА, – Випуск 4(49), 2023, с. 144–152.
5. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у галузі екологічної безпеки. Бондар О. І., Машков О.А., Присяжний В.І., Оводенко Т.С., Печений В.Л. / Екологічні науки: науково–практичний журнал. К.: ДЕА, – Випуск 3(48), 2023,с.7–16.
6. Машков О. А., Машков В. А. Забезпечення відмовостійкості складних систем на основі їх самодіагностування за принципом блукаючого ядра // Кібернетика та обчислювальна техніка, 1998.– вип. 116.– С. 103–111.
7. Машков О. А., Машков В. А. Принципи функціональної стійкості складних систем // Наука і оборона, 1995.– №2.– С. 37–44.