

UDC 556.5+627.13+518.9+682.964

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-019>

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ АПАРАТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ШТУЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

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

Досліджується можливість кількісної оцінки функціональної стабільності розподілених інформаційних і контрольних систем. Введені поняття ознак, критерії та межі функціональної стійкості, які базуються на визначенні параметрів графа, що описує структуру досліджуваної системи цього класу. У статті запропонуються ознаки та індикатори функціональної стійкості структури екологічного комплексу. Підтверджені критерії та показники функціональної стабільності критичної інфраструктури та штучних небезпечних об'єктів. Обговорюється поняття функціональної стабільності. Введені концепції дозволяють оцінити, наскільки стан екологічного комплексу (критична інфраструктура та штучно небезпечні об'єкти) знаходиться від межі стабільності, тобто стану екологічного комплексу.

Яка межа його функціональної стабільності? Цю межу також можна визначити через координату структури. У такому випадку вона характеризується низкою відмов (розрив ребер або руйнування вершин), що може призвести до переходу комплексної структури в нестабільний стан. Розроблено методи кількісної оцінки функціональної стабільності за допомогою введених індикаторів. Переваги цього підходу полягають у здатності кількісно оцінити функціональну стабільність поточної структури екологічного комплексу на основі зовнішніх ознак. На основі таких оцінок можна давати рекомендації щодо будівництва споруди або розробити обґрунтовані

вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи підтримки прийняття рішень у сфері екологічного управління. Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати вимоги до системи управління екологічною безпекою критичних інфраструктурних об'єктів і техногенно небезпечних об'єктів на етапі проектування, розв'язати задачі синтезу оптимальної структури екологічного комплексу за критерієм максимальної функціональної стабільності з обмеженням вартості будівництва та експлуатації ліній зв'язку, а також підтвердити можливість збільшення структури системи під час експлуатації.

Ключові слова : екологічний комплекс, межа функціональної стабільності, критерії та межі функціональної стабільності, об'єкти критичної інфраструктури, система підтримки екологічних рішень, система управління екологічною безпекою, техногенно небезпечні об'єкти, функціональна стабільність.

Концептуальний апарат функціональної стабільності об'єктів критичної інфраструктури та техногенних небезпечних об'єктів.
А. А. Машков, Л. М. Маркіна, В. І. Присяжний, Т. С. Оводенко.

Досліджується можливість кількісної оцінки функціональної стабільності розподілених інформаційних і контрольних систем. Введені поняття ознак, критерії та межі функціональної стійкості, які базуються на визначенні параметрів

графа, що описує структуру досліджуваної системи цього класу. У статті пропонуються ознаки та показники функціональної стійкості структури екологічного комплексу.

Обґрунтовані критерії та індикатори функціональної стабільності об'єктів критичної інфраструктури та техногенно небезпечних об'єктів.

Розглядається поняття функціональної стабільності. Впроваджені концепції дозволяють оцінити, наскільки стан екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та техногенно небезпечні об'єкти) знаходиться від межі стабільності, тобто Яка межа її функціональної стабільності? Цю межу також можна визначити через зв'язність структури.

У цьому випадку він характеризується низкою відмов (руйнування ребер або вершин), що може призвести до нестабільного стану структури комплексу.

Розроблено методи кількісної оцінки функціональної стабільності за допомогою введених індикаторів.

Переваги цього підходу полягають у здатності кількісно оцінити функціональну стабільність поточної структури екологічного комплексу на основі зовнішніх ознак.

На основі таких оцінок можна надати рекомендації щодо будівництва споруди або сформулювати обґрунтовані вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи підтримки прийняття рішень у сфері екологічного управління. Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати вимоги до системи управління екологічною безпекою критичних інфраструктурних об'єктів і техногенетично небезпечних об'єктів на етапі проектування, розв'язати задачі синтезу оптимальної структури екокомплексу за критерієм максимальної функціональної стабільності з обмеженням вартості будівництва та експлуатації ліній зв'язку, а також підтвердити можливість будівництва конструкції системи під час експлуатації.

Ключові слова: екологічний комплекс, резерв функціональної стабільності, критерій і резерв функціональної стабільності, об'єкти критичної інфраструктури, система підтримки прийняття рішень у сфері екологічного управління, система управління екологічною безпекою, техногенетично небезпечні об'єкти, функціональна стабільність.

Створемо проблему

Проблемна ситуація, що призвела до появи наукового напрямку забезпечення функціональної стабільності, пов'язана з розвитком наприкінці ХХ століття складних автономних штучних систем, що працюють у екстремальних умовах (штучно небезпечні об'єкти, об'єкти критичної інфраструктури). Їхня висока вартість і потенційна небезпека вимагали належного рівня надійності та безпеки використання. Водночас традиційні методи на основі багаторазового резервування, впровадження вбудованих систем керування та елементів з підвищеною надійністю, що погіршувало технічні та економічні характеристики розроблених систем, але не завжди призводило до необхідного зниження ймовірності виникнення небезпечних ситуацій. Необхідність впровадження додаткової апаратної резервності для забезпечення надійності системи стала важливим обмеженням цього підходу. Тому було запропоновано враховувати аномальні стани системи, спричинені збоями, як допустимі та формувати адекватне (функціонально стабільне) управління, спрямоване на регулювання наслідків відмов і підтримку виконання функцій системи. Завдяки такому управлінню забезпечується перерозподіл ресурсів системи для досягнення основної мети, навіть у разі збоїв. Вперше у публікаціях, присвячених розв'язанню конкретних задач керування складними автономними динамічними об'єктами, були наведені поняття «функціональної стабільності», його визначення та основні принципи забезпечення функціональної стабільності.

Було встановлено, що важливою умовою забезпечення цієї якості є можливість перерозподілу доступних ресурсів у системі (комплекс).

Проблема аналітичної оцінки функціональної сталості екологічної системи виникає при вирішенні проблеми забезпечення екологічної безпеки регіонів та об'єктів критичної інфраструктури. Розподілені інформаційні та контрольні системи (RICS), які містять засоби автоматизованої обробки інформації, розподілені в просторі на територіальній основі для вирішення проблем накопичення, обробки, зберігання та передачі інформації та енергії. Такі системи належать до класу складних організаційних систем і будуються на основі технологій корпоративних комп'ю-

терних мереж для прийняття управлінських екологічних рішень. Він складається з комутаційних вузлів і каналів зв'язку (ліній) між окремими елементами системи. Основна вимога RICS – виконувати основну функцію – надання корпоративним абонентам мережі потенційної можливості отримати доступ до розподіленої інформації та енергетичних ресурсів, об'єднаних в один комплекс. Всі інші вимоги, такі як ефективність, продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, надійність, розширювність і обсяг проектування, залежать від якості цього базового завдання. У сучасних умовах RICS негативно впливають внутрішні (невдачі, невдачі, помилки персоналу та працівників) та зовнішні (активний або пасивний вплив зовнішнього середовища) фактори. Тому проблема забезпечення можливості безпечної (безпомилкової експлуатації RICS) з можливим впливом негативних факторів є актуальною і ще не сформульована аналітично.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз досліджень і публікацій для забезпечення стабільності функціонування складних систем. Низка наукових статей присвячена розв'язанню проблеми забезпечення стабільності функціонування складних технічних систем [1-4]. Однак, на нашу думку, основна увага в них зосереджена на вирішенні часткових задач, а саме на створенні резервних інформаційних і контрольних систем, відмовостійких систем керування, адаптивних систем керування.

У [3] та в [6,7] вперше було введено поняття функціональної стійкості комплексних динамічних об'єктів, описаних системою диференціальних рівнянь, а в [6,7] воно було розроблено. Запропонований підхід базується на принципах комплексного спостереження, керованості та ідентифікації динамічних об'єктів. Однак такий пристрій є неприйнятним для RICS. У теорії надійності визначення індикаторів надійності базується, перш за все, на приведенні структури системи до відповідної схеми у вигляді послідовних і паралельних зв'язків модифікованих елементів. Цей підхід також не можна застосувати до складних організаційних систем із великою кількістю перехресних зв'язків (постійних і випадкових), враховуючи взаємний вплив одних елементів на

інші, тобто Для систем із випадковою структурою та зв'язками.[5]

Метою цієї статті є кількісна оцінка функціональної стабільності динамічно змінних споруд критичних інфраструктурних об'єктів та техногенно небезпечних об'єктів, запропонованих авторами математичного апарату.

Результати досліджень

У традиційних автоматичних системах керування автономними об'єктами, розділених на окремі канали, що складаються з датчиків, комп'ютерів і приводів, ресурси (енергія, обчислення, інформація), виділені для керування, жорстко фіксовані між відповідними каналами. Водночас неможливість перерозподілу ресурсів між каналами обмежує можливість формування функціонально стабільного управління. Технологічною основою забезпечення функціональної стабільності стало створення бортових інформаційних і контрольних комплексів, що дозволяло інтегрувати ресурси системи та їх перерозподіляти. Лише інтеграція всіх каналів автоматичних систем керування в один інформаційно-контрольний комплекс, де підсистема інформації та вимірювання включатиме всі джерела інформації, пристрої транскодування та зв'язку, обчислювальну систему – всі комп'ютери, а енергетична підсистема – всі активатори та джерела енергії, забезпечить її функціональну стабільність. Слід пам'ятати, що можливість інтегрованого використання ресурсів і забезпечення функціональної стабільності систем обмежена умовами стабільності динамічної системи, її керованістю та спостережуваністю за Кальманом. На сьогодні досить повне дослідження умов забезпечення функціональної стабільності проведено лише для лінійних стаціонарних моделей динамічних систем, які не стагнують.

А. Критерії та показники функціональної стабільності критичної інфраструктури та техногенних небезпечних об'єктів

Функціональна стабільність розглядатиметься як здатність об'єктів виконувати свої функції протягом певного періоду часу у разі серії операційних збоїв, навмисних пошкоджень, перешкод

обміну та обробці інформації й енергії, а також у разі технічних помилок персоналу [5, 7].

Функціональна стабільність складного екологічного комплексу (об'єкти критичної інфраструктури та штучні небезпечні об'єкти) поєднує властивості надійності, стійкості до помилок, живучості та характеризує здатність екологічного комплексу відновлювати робочий стан шляхом використання надлишкових ресурсів.

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

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

Множина вершин V відповідає множині комутаційних вузлів n і множини ребер E – множині ліній зв'язку між комутаційними вузлами. Припускаємо, що RICS виконує базову функцію обміну даними, якщо існує принаймні один спосіб передачі інформації між будь-якою парою комутаційних вузлів. Таким чином, вимога графової зв'язності дає підстави для кількісної оцінки функціональної стабільності розподіленої інформації та Системи керування.

Ми розглянемо якість виконання основних функцій, яка описується часом затримки повідомлення при перенаправленні. Ми також приймаємо, що канали зв'язку мають пропускну здатність, яка дозволяє передавати довільно великий потік інформації.

У технічній кібернетиці, а саме в теорії автоматичного керування, вводиться класична теорія стійкості динамічних систем, засновником якої є А. М. Ляпунов. У цій теорії стабільність можна оцінити не шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують об'єкт, а за допомогою простих знаків, умов і критеріїв стійкості, розроблених І. Вишеградським, А. Гурвіцем, А. Михайловим, Г. Ньюквістом та іншими. [3]. За аналогією з класичною теорією стабільності пропонується оцінювати функціональну стійкість відповідно до параметрів графа, що описує структуру екологічного комплексу.

Виходячи з типу графа та його параметрів, можна визначити, чи буде система функціонально стабільною, нестабільною чи нейтральною.

Ознака функціональної стабільності структури екологічного комплексу. Структура екологічного комплексу є функціонально стабільною, якщо граф структури є однокомпонентним і не має мостів і вузлів з'єднання. Обернене визначення дозволяє визначити функціональну нестабільність структури.

Ознака функціональної нестабільності конструкції. Структура екологічного комплексу є функціонально нестабільною, якщо його граф багатокомпонентний і не пов'язаний.

Таким чином, на основі аналізу зовнішнього вигляду графа, а саме за кількістю компонентів, наявністю мостів і вузлів графового з'єднання, можна зробити висновок про функціональну стійкість структури, тобто про її власну здатність уникати руйнування та пошкодження. Однак для графів з високими гілками та багатoverшинами важко зробити оцінку на основі зовнішнього вигляду. Тому для кількісної оцінки ступеня функціональної стійкості ми введемо *Індикатори функціональної стійкості структури екологічного комплексу*:

А. Індекс зв'язку $\chi(G)$ вершин – це найменша кількість вершин, видалення яких разом із випадковими ребрами призводить до утворення некогерентного або одновршинного графа.

Б. Індикатор зв'язку ребер $\lambda(G)$ – це найменша кількість ребер, видалення яких призводить до незв'язного графа.

В. Ймовірність комунікації $P_{ij}(t)$ – це ймовірність того, що повідомлення з вузла i до вузла j буде передано за час не більше t .

Аналіз цих показників дозволяє виділити такі характеристики:

– З'єднання вершин і ребер характеризує лише поточну структуру, незалежно від надійності комутаційних вузлів або ліній зв'язку;

– $\chi(G)$ індикатори та $\lambda(G)$ отримання цілих значень і пов'язаних коефіцієнтів

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

– Ймовірність зв'язку $P_{ij}(t)$ дозволяє враховувати надійність комутаційного обладнання, тип фізичного каналу для передачі інформації, наявність резервних каналів і маршрутів, а також підключення розподіленої структури. Водночас розрахунок $P_{ij}(t)$ значень є складним і складним завданням;

– Ймовірність зв'язку характеризує зв'язок лише однієї пари вершин. Щоб охарактеризувати зв'язок усіх пар вершин, необхідно працювати з матрицею ймовірностей зв'язку $P = \|P_{ij}\|$, $i, j = 1, \dots, n$.

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

1. *Структурний критерій*. Структура екологічного комплексу буде функціонально стабільною, якщо значення вершинних і реберних зв'язок відповідні

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

2. *Ймовірнісний критерій*. Структура екологічного комплексу буде функціонально стабільною, якщо надійність зв'язку кожної пари вершин не менша за задану

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

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

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

Б. Межі та сфери функціональної стабільності розподілених інформаційних і контрольних систем

На межі зон стабільності та нестабільності існує певна зона, в якій тема системи не є функціонально стабільною і водночас не є функціонально нестабільною. Таке поле, за аналогією з теорією стійкості динамічних систем [3], називається межею функціональної стійкості структури.

Ознака функціональної стабільності. Поточна структура знаходиться на межі функціональної стабільності, якщо граф структури узгоджений, має мости ($NE \geq 1$) або вузли з'єднання ($NV \geq 1$)

$$\{K = 1\} \wedge [\{NV \geq 1\} \vee \{NE \geq 1\}],$$

де K – кількість компонентів графа, а умова $K = 1$ означає, що граф зв'язний, NV (NE) – кількість вузлів з'єднання (мостів) графа.

Міст – це ребро зв'язаного графа, яке з'єднує два підграфи, після чого граф перетворюється з однокомпонентного на двокомпонентний граф. У деяких працях з теорії графів міста називають

перешийком. Вузол з'єднання називається такою вершиною зв'язаного графа, після видалення якого разом із випадковими ребрами граф перетворюється з однокомпонентного на двокомпонентний граф.

Наявність мосту або вузла, який з'єднує два підграфи в структурі, означає, що всі маршрути передачі інформації від вершин одного підграфа до верхньої частини іншого містять цей міст або вузол з'єднання. Це суттєво знижує надійність споруд і функціональну стабільність RICS. Тому, щоб забезпечити функціонально стабільний стан системи, щоб уникнути мостів або вузлів з'єднання, рекомендується вводити в її структуру резервні лінії зв'язку. Водночас існує кілька незалежних і альтернативних способів передачі інформації.

Аналіз структур показує, що коли система перебуває на межі стабільності, вона працює і виконує необхідну кількість функцій. Однак, якщо хоча б один міст або вузол з'єднання виходить з ладу, система переходить у нестабільний стан.

Області функціональної стійкості та нестійкості можна відобразити у декартовому просторі за координатами $\lambda(G)$, $\chi(G)$ (рис. 1). Точка на площині, що характеризує стан системи, визначається значеннями параметрів $\lambda(G)$, $\chi(G)$ графа структури системи.

У графічному представленні межею функціональної стійкості екологічного комплексу буде геометричне розташування точок, що лежать на двох прямих $\chi(G) = 1$ та $\lambda(G) = \chi(G)$ (див. рис. 1).

Межа функціональної стабільності екологічного комплексу

Впроваджені концепції дозволяють оцінити, наскільки стан екологічного комплексу (критична інфраструктура та штучно небезпечні об'єкти) знаходиться від межі стабільності, тобто Яка межа її функціональної стабільності? Цю межу також можна визначити через координацію структури. У такому випадку вона характеризується низкою відмов (розрив ребер або руйнування вершин), що може призвести до переходу комплексної структури в нестабільний стан.

Межу функціональної стабільності екологічного комплексу можна кількісно оцінити за допомогою наступних показників:



Рисунок 1. Геометрична інтерпретація областей функціональної стабільності та нестабільності

А. Стійкість ребер дорівнює значенню Z_E , яке дорівнює відстані від точки з координатами $(\chi(G), \lambda(G))$ у області функціональної стійкості до прямої $\lambda(G) = 1$

$$Z_L = \lambda(G) - 1$$

Б. Вертикальна межа стійкості – це значення Z_V , яке дорівнює відстані від точки з координатами $(\chi(G), \lambda(G))$ у області функціональної стійкості до прямої $\chi(G) = 1$

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

Також можливо обчислити функціональну межу стабільності як різницю між поточним P_{ij} і заданим P_{ij}^S із значеннями ймовірності зв'язку. Очевидно, що в цьому випадку межа буде визначена квадратичною матрицею

$$\mathbf{Z}_P = \|z_{ij}\|, \quad z_{ij} = P_{ij} - P_{ij}^S.$$

Таким чином, після знаходження запропонованих параметрів за допомогою ознак функціональної стабільності можна визначити, чи перебуває екологічний комплекс у функціонально стабільному чи нестабільному стані.

Межу функціональної стабільності, яка визначає ступінь цієї стійкості, можна знайти як аналітично на основі запропонованих формул, так

і графічно (див. рис. 1). Проведені дослідження дозволяють навіть на етапі проектування обґрунтувати вимоги до системи екологічної безпеки критичної інфраструктури та штучно небезпечних об'єктів.

Об'єкти розв'язують задачі синтезу оптимальної структури екологічного комплексу за критерієм максимальної функціональної стабільності з обмеженням вартості будівництва та експлуатації ліній зв'язку, а також обґрунтовують можливість збільшення структури системи під час експлуатації.

Висновки

У статті пропонуються ознаки та індикатори функціональної стійкості структури екологічного комплексу. Вперше введено поняття меж і меж функціональної стійкості екологічного комплексу. Розроблено методи кількісної оцінки функціональної стійкості за допомогою введених індикаторів.

Переваги цього підходу полягають у здатності кількісно оцінити функціональну стійкість поточної структури РІКС на основі простих зовнішніх ознак. побудова структури або розвиток розумного.

Вимоги до системи управління екологічною безпекою та системи екологічної підтримки прийняття рішень.

Список використаних джерел

1. Нільс Дж. Нільссон. Пошук штучного інтелекту. – 1. - Cambridge University Press, 2019. – 578 с. – ISBN 978-0521116398.
2. Стюарт Дж. Рассел, Пітер Норвіг. Штучний інтелект: сучасний підхід. – 3. – Пірсон, 2015. – ISBN 978-9332543515.
3. Барабаш О. В., Козелков С. В., Машков О. А. Концептуальний апарат функціональної стабільності розподілених інформаційних і керуючих систем // Збірка наукових праць Національного центру ВПС Збройних сил України. - 7 Т.№ 2005. – С.87 – 95.
4. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Аваденко Т. С., Печений В. Л. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки / екологічних наук: науково-практичний журнал. Нью-Йорк: ДЕА, випуск 4(49), 2023, с. 144-152.
5. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки. Бондар О. І., Машков О. А., Присяжний В. І., Аваденко Т. С., Печений В. Л. / Екологічні науки: Науково-практичний журнал. Нью-Йорк: ДЕА, випуск 3(48), 2023, стор. 7-16.
6. Машков О. А., Машков В. А. Забезпечення стійкості до відмов складних систем на основі їх самодіагностики за принципом блукаючого ядра // Кібернетика та обчислювальні технології, випуск 1998. 116.- с. 103-111.
7. Машков О. А., Машков В. А. Принципи функціональної стабільності складних систем // Наука і оборона, 1995.- № 2.- С. 37-44.