

УДК 519.86:004.94

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ВІДНОВЛЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ РИЗИКУ КАТАСТРОФ

Толочний І.В.

e-mail: ihor.tolochnyi@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра прикладної математики
м. Харків, Україна

This work examines the "Human-Machine-Environment" (HME) system within a state space to model disaster recovery. Based on the Markov property, state transitions depend solely on the system's current condition. Integrated with queuing theory, this approach optimizes HME structures to enhance response efficiency and significantly reduce time during catastrophes. Furthermore, it enables analysis of rescue subsystems by treating accident elimination as a stationary condition – a task resolved by applying the Second Law of Synergetics to determine transition probabilities. The results present a synergetic approach to enhancing safety systems.

Системний аналіз процесів відновлення безпечної життєдіяльності став стратегічним інструментом у прийнятті управлінських рішень, поєднуючи теорію надійності з методами математичного програмування. Цей підхід дозволяє розв'язувати комплексні задачі оцінки стану критичної інфраструктури, де традиційні методи прогнозування стикаються з обмеженнями через високу невизначеність та динаміку ризиків катастроф. Моделі інтегрують фундаментальні закони збереження ресурсів безпосередньо у функцію управління системою, що забезпечує відповідність стратегій відновлення граничним умовам безпеки [1, 2].

Основна ідея підходу полягає у визначенні стратегії управління як послідовності перехідних станів, що мінімізують інтегральний ризик у системі «Людина-Машина-Середовище» (HME). Також до цільової функції включають обмеження на ресурси, що дозволяє отримувати оптимальні плани відновлення навіть для перенасичених задач з дефіцитом часу.

Основні принципи моделювання. Моделі апроксимують процес відновлення через нелінійне відображення між станом пошкоджень та цільовими показниками безпеки. Системний підхід передбачає мінімізацію сумарної похибки (нев'язки), яка включає:

- похибку відхилення від нормативних показників безпеки, що забезпечує дотримання обмежень на межі допустимого ризику;
- похибку залишку динамічних рівнянь, яка відображає ступінь відхилення прогнозу від реальної динаміки переходу системи між станами;
- похибку початкових умов, що гарантує відповідність розв'язку реальному стану інфраструктури на момент початку операцій відновлення.

Методи теорії черг та марковських процесів, інтегровані в модель, дозволяють точно обчислювати ймовірності переходів, необхідні для формування стратегій відновлення критичних вузлів.

Обмеження класичних моделей. Незважаючи на універсальність, традиційні методи моделювання мають суттєві недоліки при роботі з:

- сильно нелінійними сценаріями розвитку катастроф, де взаємозв'язок між підсистемами призводить до нестійкості управлінських рішень та виникнення ефекту доміно;

- багатофакторними системами, де обчислення параметрів взаємодії великої кількості вузлів інфраструктури вимагає значних ресурсів;

- довгочасними процесами відновлення, де похибка прогнозу накопичується з часом через статичний підхід до всієї часової області.

Розширення методів моделювання для складних систем. Для подолання обмежень розроблено адаптивні підходи до моделювання (Adaptive Recovery Modeling). Вони пропонують послідовне коригування стратегій відновлення зі збереженням зворотної сумісності з попередніми станами. Ключові особливості:

- розбиття часової області відновлення на сегменти, де кожен наступний етап використовує фактичний стан інфраструктури як початкову умову;

- функція втрат із додатковим адаптивним коефіцієнтом, який гарантує стабільність збіжності до безпечних параметрів життєдіяльності;

- фазові простори для аналізу стійкості, що зменшують складність обчислень шляхом розкладу інтегральної задачі на систему підзадач локального рівня [3].

Список використаних джерел:

1. Haimes Y. Y. Risk Modeling, Assessment, and Management [Electronic resource] / Y. Y. Haimes // Wiley Series in Systems Engineering and Management. 2015. Vol. 1. P. 150–185. Mode of access: <https://doi.org/10.1002/9781119001140> (date of access: 04.03.2025). Title from screen.

2. Paté-Cornell E. On the role of modeling in disaster management and risk analysis [Electronic resource] / E. Paté-Cornell // Risk Analysis: An International Journal. 2018. Vol. 38, Is. 6. P. 1105–1112. Mode of access: <https://doi.org/10.1111/risa.12942> (date of access: 04.03.2025). Title from screen.

3. Karamouz M., Szidarovszky F., Zahraie B. Water resources systems analysis [Electronic resource] / M. Karamouz, F. Szidarovszky, B. Zahraie // CRC Press. 2021. Vol. 2. P. 210–235. Mode of access: <https://doi.org/10.1201/9781003186250> (date of access: 04.03.2025). Title from screen.