

ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ПРИРОДНО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ КАСКАДНОГО ТИПУ

Анотація

Розглянуто деякі проблеми моделювання надійності складних природно-технічних систем каскадного типу з точки зору особливостей їх структури та функціонування. Запропоновано підхід до оцінки їх надійності на основі методів теорії ризику.

Аннотация

Рассмотрены некоторые проблемы моделирования надежности сложных природно-технических систем каскадного типа с точки зрения особенностей их структуры и функционирования. Предложено подход к оценке их надежности на основе методов теории риска.

Annotation

Some problems of the reliability modeling of complicated nature-technical cascade systems according to peculiarities of their structure and work have been considered. An approach to the reliability assessment of these systems in frame of risk theory has been proposed.

Сучасні інженерні споруди - це унікальне явище цивілізації, в яких техногенна й природна складові тісно переплітаються і, взаємодіючи на загальносистемному рівні, породжують нове об'єктивне явище-складні природно-технічні системи (СПТС).

Серед СПТС виділяються системи каскадного типу (каскадні системи) - які утворюються ланцюжком підсистем, що мають висотно-географічне положення на місцевості і (або) які зв'язують окремі підсистеми в каскад маси й енергії. Прикладом такої системи є каскад гідровузлів на Дніпрі.

В каскадних системах одночасно можуть проявлятися як ефекти *емерджентності* (набуття нових властивостей) окремими підсистемами, так і *синергізму* (підсилення системних ефектів) й *нейтралізації* (послаблення системних ефектів) [1]. Характерною рисою каскадних СПТС є можливість розвитку при відмові (аварії) однієї з підсистем каскадної аварії згідно з ефектом «доміно» [2].

Вибір адекватної математичної моделі надійності для каскадної СПТС є непростю задачею. При цьому не завжди можна обмежитись комбінаціями

простих логічних схем послідовного (без надмірності) й паралельного (з надмірністю) за надійністю з'єднань її структурних компонентів - окремих підсистем.

Розглянемо кілька моделей надійності систем без надмірності, які, в залежності від структури, особливостей функціонування та взаємодії підсистем, можуть використовуватися як моделі надійності СПТС каскадного типу.

Модель 1. Нехай система S_n складається з n підсистем, s_i , $i = 1, \dots, n$ відмова (аварія) будь-якої з них означає аварію системи. Покладемо: 1) в каскадній системі S_n встановлюється жорсткий порядок спрацювання підсистем, починаючи з першої з, й закінчуючи останньою s_n ; 2) відмови підсистем s_i є незалежними подіями до виникнення першої відмови в системі S_n , тобто

$P(s_i, s_j) = P(s_i)P(s_j)$ де $P(s_i, s_j)$ - ймовірність одночасної відмови s_i та s_j підсистем; $P(s_i)$ - ймовірності відмов окремих підсистем, відповідно.

З врахуванням незалежності відмов окремих підсистем до виникнення першої відмови в системі маємо умовну ймовірність системної відмови [3]:

$$P(S_n) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(s_i)]$$

Повна ймовірність відмови каскадної системи на нормованій множині розрахункових небезпек $Q^n = \{q_k\}, k = 1, \dots, n$ буде:

$$P(S_n) = \sum_{k=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^k [1 - P(s_i)] \right) P_n(q_k)$$

де $P_n(q_k)$ - нормована ймовірність реалізації небезпеки (Q_k)

Для альтернативної системи, яка складається з однієї підсистеми:

$$P(S, q_1) = P(S)P(q_1) = P(S)P_n^{\max}(q_k)$$

де $P(q_k) = P_n^{\max}(q_k)$ - зазвичай максимальна з ймовірностей $P_n(q_k)$.

Модель 2. Нехай в каскадній системі S_n задається напрямок розташування підсистем як «сходинок» в каскаді від s_1 (найвища за висотно-географічним положенням «сходінка» каскаду) до s_n (остання «сходінка» каскаду).

В цьому випадку може проявитися залежність між відмовами підсистем у напрямку їх каскадного розташування. За найбільш песимістичним сценарієм результатом може бути руйнування всіх підсистем у каскаді від s_1 до s_n .

Визначимо каскадну аварію як аварію, в результаті розвитку якої буде зруйновано не менше двох підсистем.

Розглянемо умовну ймовірність $P(A, 1S_n)$ аварії A в системі S_n в результаті відмови підсистеми s_1 . Безумовна ймовірність аварії A буде:

$$P(A) = P(A, 1S_n)P(S_n) \quad (4)$$

Для оцінки ймовірностей $P(A, 1S_n)$ використаємо рішення [4], поклавши

априорну ймовірність реалізації аварії A_i рівною $P(s_i)$:

$$P(A_i | S_n) = \frac{P(s_i)P(S_n | A_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)P(S_n | A_i)}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n (S_n | A_i) = \Omega, P(\Omega) = 1; (S_n | A_i) \cap (S_n | A_j) = \emptyset, i \neq j; P(S_n | A_i) = \frac{P(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}. \quad (6)$$

Задамо множину умов $\{C_i^*\}, i = 2, \dots, n$, виникнення «наведених» (вторинних, залежних) відмов підсистем в каскадній системі S_n у напрямку розвитку каскадної аварії від z_1 до z_n . Тоді верхні граничні оцінки (sup) безумовних ймовірностей потенційно можливих сценаріїв розвитку каскадної аварії в системі $S_n = \{s_i, i = 1, \dots, n\}$ будуть: при відмові підсистеми S_i (першої «сходінки» каскаду)

$$P(S_n, A_i)^{\sup} = P(A_i) \left[1 - \prod_{i=2}^n (1 - P(C_i^*)) \right]; \quad (7)$$

при відмові i -ї підсистеми в каскаді

$$P(S_n, A_i)^{\sup} = P(A_i) \left[1 - \prod_{j=i+1}^n (1 - P(C_j^*)) \right]; \quad (7)$$

й т. д., включно підсистему

$$P(S_n, A_{n-1})^{\sup} = P(A_{n-1})P(C_n^*). \quad (8)$$

Верхня гранична оцінка (sup) ймовірності виникнення будь-якого з потенційно можливих сценаріїв розвитку каскадної аварії в системі буде

$$P(S_n, A)^{\sup} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^{n-1} (1 - P(S_n, A_i)^{\sup}) \right). \quad (9)$$

Модель 3. Нехай каскадна система складається з не строго впорядкованої множини підсистем: $S_n = \{s_i\}, i = 1, \dots, k, \dots, n; s_1 \succ s_2, \dots, \succ s_k, \dots, \succ s_n$, де символом $\succ$ позначено відношення «м якого» пріоритету підсистем.

Покжемо, що відмова підсистеми s_1 має найбільшу важливість, у порівнянні з відмовами інших підсистем; далі йде підсистема s_2 - у порівнянні з наступними в каскадному розташуванні і за нумерацією підсистемами й т. д.

Якщо в каскадній системі підсистема виконала свою функцію, то пріори-

тет («м'яко») переходить до підсистеми S_2 . Виключивши, умовно, підсистему

з системи S_1 отримаємо підсистему $S_{n-1} = \{e_i\}, i = 2, \dots, k, \dots, n$, у якій
 незірність системної аварії A_{n-1} визначається взаємодією підсистем

$\{s_i\}, i = 2, \dots, k, \dots, n$:
 Використавши прийоми перетворення ймовірностей, що були застосовані

в моделі 2, отримаємо для підсистеми $S_{n-k+1} = \{s_i\}, i = k, \dots, n$:

$$P(A_k | S_{n-k+1}) = \frac{P(s_k)P(S_{n-k+1} | A_k)}{\sum_{i=k}^n P(s_i)P(S_{n-k+1} | A_i)}; \quad (Ю)$$

$$P(S_{n-k+1} | A_k) = \frac{P(s_k)}{\sum_{i=k}^n P(s_i)}; \quad (11)$$

$$\sum_{i=k}^n (A_{n-k+1} | A_k) = \Omega, P(\Omega) = 1; (S_{n-k+1} | A_i) \cap (S_{n-k+1} | A_j) = \emptyset, i \neq j;$$

$$\sum_{i=k}^n P(S_{n-k+1} | A_i) = 1; P(A_k) = P(S_{n-k+1})P(A_k | S_{n-k+1}); P(A_n) = P(s_n) \quad (12)$$

У результаті перетворення ймовірностей маємо повну ймовірність виникнення каскадної аварії у системі S_n :

$$P(S_n) = P(A_1) + \sum_{i=1}^{n-2} (1 - P(A_i))P(A_{i+1}) + (1 - P(A_{n-1}))P(A_n). \quad (14)$$

В цій моделі система відображається «вкладеними» за принципом «матрьолки» одна в одну системами нижчого рівня з послідовним з'єднанням елементів. Спочатку розглядається система, що складається зі всіх n підсистем. Якщо відмовила перша в каскаді підсистема, то відмовила вся система. Потім, якщо з підсистемою s , все гаразд, розглядається нова умовна система, без s , й так далі. При цьому відмова кожної з наступних «систем» - це відмова висхідної каскадної системи $S_n = \{s_i\}, i = 1, \dots, k, \dots, n$.

Література:

1. Стефанишин Д.В., Романчук К.Г. Особливості оцінки надійності систем каскадного типу// Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Вип. 4(36). Частина 1. Рівне: НУВГП. 2006. С. 248-355.

2. Стефанишин Д.В., Романчук К.Г. Оцінка ймовірності розвитку гідродинамічної аварії, викликаной ефектом «доміно», на каскаді напірних гідротехнічних споруд // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Вип. 2 (38). Рівне: НУВГП. 2007. С.192-198.

3 Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. - СПб.: ВНИИГим. Б.Е. Веденеева, 2002.

Стефанишин Д.В. Моделювання системних ризиків в рамках байєсівського підходу// Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 2(30). Рівне: НУВГП. 2005 С. 83-90.