

УДК 004.942

К.Г. РОМАНЧУК

МЕТОД ОЦІНКИ ЗНАЧУЩОСТІ ЗА ФУССЕЛЕМ – ВЕСЛІ МОДЕЛЬНИХ СЦЕНАРІЇВ СИСТЕМНИХ АВАРІЙ НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

***Анотація.** В рамках сценарного підходу до кількісної оцінки ризиків збитків від аварій в складних інженерних системах з використанням байєсівського перетворення ймовірностей аварійних подій запропоновано метод оцінки значущості модельних сценаріїв системних аварій за ймовірністю та ризиком збитків.*

***Ключові слова:** байєсівське перетворення ймовірностей, значущість, модельний сценарій, повна група подій, потенційно небезпечний об'єкт, ризик збитків, системна аварія, сценарний підхід.*

Вступ

В якості основного принципу управління безпекою потенційно небезпечних об'єктів (ПНО), зокрема гідровузлів, при кількісній оцінці ймовірностей та ризику аварій на них, може прийматися принцип розумно досяжного низького рівня ризику (risk as low as reasonably practicable, ALARP). Згідно з цим принципом для особливо відповідальних об'єктів і систем з метою забезпечення їх надійності і техногенної безпеки оцінюються ймовірності аварій, які порівнюються з деякими допустимими величинами, що встановлюють межу терпимості техногенного ризику. Отримані при цьому ризики від аварій можуть вважатися прийнятними у всіх випадках, коли подальше їх зменшення стає або практично неможливим (за наявних економічних, технологічних та інших умов), або коли ціна такого зменшення стає непропорційно великою порівняно з отриманим при цьому зменшенням ризику і, відповідно, підвищенням надійності й безпеки ПНО [1].

Оскільки не тільки ймовірності, але і наслідки аварій від різних причин на одному й тому ж об'єкті можуть різнитися, то управління ризиками збитків як комбінаціями ймовірностей аварійних подій і їх наслідків може бути значно гнучкішим, аніж управління ризиками лише за ймовірностями аварій [2–6]. Однак для того, щоб таке управління було ефективним, необхідно забезпечити можливість ранжирування аварійних подій за значущістю як за ймовірностями їх виникнення, так і за ризиками збитків.

При оцінці ймовірності техногенної аварії здійснюється агрегація (узагальнення) значення її ймовірності як системної аварії за різними можливими причинами її виникнення та умовами перебігу [7–10]. Сценарний підхід до оцінки ризику аварій на ПНО дозволяє формалізувати задачу кількісного оцінювання ризику збитків з врахуванням можливості виникнення системної аварії з довільних причин та її розвитку за різними модельними сценаріями [10–13]. У свою чергу, ранжирування модельних сценаріїв системної аварії за значущістю забезпечить краще розуміння поведінки складної інженерної системи і дозволить контролювати ефективність заходів, направлених на підвищення її надійності і безпеки [2, 14, 15]. При

цьому можуть виявлятися пріоритетні чинники аварійності й обґрунтуватись потреба в затратах на підвищення надійності і безпеки ПНО. Дослідження значущості аварійних подій подібне до аналізу чутливості і може також бути корисним при оптимізації структурного складу системи, діагностиці «слабких» ланок серед її компонентів, оптимізації їх надійності з врахуванням економічних показників тощо.

1. Загальна постановка задачі

Значущими прийнято називати окремі аварійні події, види або форми аварії, або ж сценарії аварії, які можуть безпосередньо спричинити системну аварію на ПНО [2]. Кількісні показники значущості аварійних подій в системах, що наразі розглядаються в літературі [2, 14, 15], ґрунтуються на імовірнісній мірі.

Серед показників значущості, що пропонуються різними авторами [2, 14, 15], виділяється значущість за Фусселем – Веслі, яка, зокрема, може встановлюватися для окремих базових аварійних подій та окремих перерізів аварійних подій (видів, форм аварій тощо) при оцінці ймовірностей техногенних аварій за допомогою логіко-імовірнісного методу дерев відмов і несправностей [2–7, 10, 11, 15, 16].

Наприклад, для окремої базової (початкової) аварійної події значущість за Фусселем – Веслі має визначатися як ймовірність того, що при виникненні системної відмови (аварії в системі) відбудеться відповідна базова подія, тобто встановлюється за умови, що системна відмова або аварія в системі відбулися. Для окремого перерізу аварійних подій (виду, форми аварій тощо), що призводять до системної аварії, значущість за Фусселем – Веслі має визначатися як ймовірність того, що при системній аварії (відмови системи в цілому) відбувається відповідний переріз аварійних подій (вид, форма аварії тощо). Також встановлюється за умови, що системна аварія відбулася.

Таким чином, значущість за Фусселем – Веслі для деякої базової аварійної події або для деякого перерізу аварійних подій (сценарію тощо) має визначатися як відносна «вага» відповідної аварійної події або відповідного перерізу аварійних подій за ймовірністю в повній ймовірності $P(A)$ системної аварії [2]. Відповідно, для оцінки значущості за Фусселем – Веслі необхідно не тільки здійснити імовірнісне моделювання техногенних аварій з врахуванням різних аварійних подій, що можуть призвести до аварії, в тому числі і з врахуванням гіпотетичних подій-припущень, з кількісною оцінкою ймовірностей їх реалізації формальними методами, а й здійснити їх «зважування» в групі повних подій. Однак, і при такому підході до оцінки значущості аварійних подій не враховується те, що різні події можуть бути обтяжені різними наслідками.

2. Моделювання та кількісна оцінка ризику збитків в рамках сценарного підходу

Вибір модельних сценаріїв аварій на ПНО при кількісній оцінці ризику збитків має ґрунтуватися на наступних принципах системного аналізу:

– альтернативності, що допускає використання різних підходів, методів та моделей (статистичних, імовірнісних, логічних тощо) при оцінці

ймовірностей аварійних подій, які здатні зумовлювати і обумовлювати системні аварії за різними сценаріями;

– системності, що виходить із необхідності оцінки ймовірностей техногенних аварій з врахуванням системних зв'язків між різними аварійними подіями на ПНО (на спорудах, в їх основах та фундаментах, в навколишньому середовищі, відмовами та несправностями окремих конструктивних елементів, пристроїв, устаткування і обладнання);

– комплексності, що передбачає врахування при оцінці ймовірностей системних аварій різних факторів (природних, проектно-конструкційних, будівельно-технологічних, експлуатаційних тощо), які можуть визначати надійність об'єктів, різних даних, зокрема даних моніторингу навколишнього середовища, візуального й інструментального контролю стану споруд та конструкцій, результатів розрахунків їх стійкості і міцності традиційними методами, а також можливість реалізації як типових, так і нетипових сценаріїв аварії, наприклад, внаслідок відмов автоматики тощо [12];

– ієрархії, згідно з яким враховується причинно-наслідкова супідрядність аварійних подій і станів, відмов і несправностей окремих елементів ПНО як структурних одиниць єдиної природно-технічної системи; при цьому при надмірній складності ієрархічної структури може використовуватися системно-інтегруючий підхід (агрегація), коли більш деталізовані аварійні події й стани, що відповідають нижчим рівням ієрархії в причинно-наслідкових відношеннях, інтегруються у більш загальні і менш деталізовані події й стани, які відповідають більш високим рівням ієрархії у причинно-наслідкових відношеннях;

– найменшій взаємодії, згідно з яким ієрархія розрахункових аварійних подій і станів, відмов і несправностей окремих структурних елементів і підсистем ПНО враховується таким чином, щоб мінімізувати причинно-наслідкові відношення між ними.

Такий підхід до імовірнісного моделювання техногенних аварій дозволяє забезпечити адекватність імовірнісних оцінок аварійності на техногенних об'єктах. Власне це і дало поштовх до оцінки значущості небезпечних аварійних подій за ймовірністю їх реалізації. Оцінка ймовірності аварії в цьому сенсі стала засобом для розкриття невизначеності та прийняття оптимальних рішень, направлених на підвищення рівня безпеки об'єкта.

Байєсівське перетворення ймовірностей [13, 16–18] в рамках сценарного підходу до оцінки узагальненого за різними модельними сценаріями (сумарного) ризику збитків від аварії в складній інженерній системі дозволяє розширити інтерпретацію значущості за Фусселем – Веслі і встановлювати значущість окремих модельних сценаріїв аварії як за ймовірністю їх реалізації, так і за ризиком збитків.

Назвемо сценарієм A_i можливої аварії A на ПНО деяку ідеалізовану аварійну подію-припущення, несумісну з іншими визначеними в якості модельних сценаріїв аварії A ідеалізованими аварійними подіями-припущеннями у складі повної групи подій [13]:

$$P(A_i) = P(A_i | A) \cdot P(A), \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = P(A), \sum_{i=1}^n P(A | A_i) = 1; (A | A_i) \wedge (A | A_k) = \emptyset; i \neq k; i, k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$P(A_i | A) = \frac{P(A | A_i) \cdot P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A | A_i) \cdot P(A_i)}, \quad (3)$$

де $P(A_i)$ – ймовірність реалізації сценарію A_i системної аварії A ; $P(A_i | A)$ – умовна ймовірність аварії A за сценарієм A_i ; $P(A)$ – повна ймовірність виникнення системної аварії A ; $P(A | A_i)$ – умовна ймовірність аварії A за умови її реалізації за сценарієм A_i .

Сумарний (узагальнений за модельними сценаріями $A_i, i = \overline{1, n}$) ризик збитків $R(D, A)$ системної аварії A будемо оцінювати як [13, 17, 18]:

$$R(D, A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot D(A_i), \quad (4)$$

де $D(A_i)$ – збиток, якщо аварія A відбувається за модельним сценарієм A_i .

3. Оцінка значущості модельних сценаріїв аварії за ймовірністю та ризиками збитків

Обумовимо кожен i -й модельний сценарій системної аварії деякою i -ю аварійною подією F_i (наприклад, формою аварії, безпосередньою причиною виникнення аварії, базовою аварійною подією тощо). В загальному випадку $F_i, i = \overline{1, n}$, можуть бути довільними подіями-наслідками реалізації довільних подій-причин $E_j \in \mathbf{E}, j = \overline{1, m}$.

Ймовірності $P(F_i)$ подій-наслідків $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$, та ймовірність $P(A)$ аварії A на ПНО, в залежності від системної організації об'єкта, особливостей споруд і конструкцій, функціонування обладнання тощо, в загальному випадку як системи \mathbf{S} , можна визначити за допомогою відповідних структурних функцій її надійності (безпеки) [2-12, 14, 16, 19]:

$$\Psi(\mathbf{S} | F_i) : \mathbf{E} \rightarrow F_i, i = \overline{1, n}; \quad \Psi(\mathbf{S}) : \mathbf{E} \rightarrow A. \quad (5)$$

Для кожного з модельних сценаріїв $A_i, i = \overline{1, n}$, згідно з однією з фундаментальних теорем теорії ймовірностей [20], можна записати:

$$P(A | A_i) \cdot P(A_i) = P(A_i | A) \cdot P(A). \quad (6)$$

Визначимо ймовірність $P(A|A_i)$ як «вагу» відповідного збитку, пов'язаного з реалізацією події F_i , за ймовірністю $P(F_i)$:

$$P(A|A_i) = \frac{P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)} . \quad (7)$$

Прирівнявши у формулах (3) і (6) ймовірність $P(A_i)$ до $P(F_i)$, маємо ймовірність реалізації модельного сценарію A_i аварії A :

$$P(A_i) = \frac{P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i)}{\sum_{i=1}^n \left(P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i) \right)} \cdot P(A) . \quad (8)$$

Тоді, значущість сценарію A_i згідно з Фусселем – Веслі за ймовірністю буде:

$$w_p(A_i) = \frac{P(A_i)}{P(A)} = \frac{P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i)}{\sum_{i=1}^n \left(P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i) \right)} , \quad (9)$$

або, у відсотках,

$$w_p(A_i)\% = \frac{P(A_i)}{P(A)} \cdot 100 = \frac{P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i)}{\sum_{i=1}^n \left(P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i) \right)} \cdot 100 , \quad (10)$$

де $P(A_i)$ – ймовірність реалізації модельного сценарію A_i за умови, що аварія A відбувається за цим сценарієм; $P(F_i)$ – ймовірність реалізації i -ї довільної форми аварії на об'єкті, з якою пов'язується виникнення сценарію A_i .

Відповідно, значущість сценарію A_i за ризиком буде:

$$w_R(A_i) = \frac{P(A_i) \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot D_i} , \quad (11)$$

або, у відсотках,

$$w_R(A_i)\% = \frac{P(A_i) \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot D_i} \cdot 100, \quad (12)$$

де $D(A_i)$ – збиток, якщо аварія A відбувається за модельним сценарієм A_i .

4. Приклад оцінки значущості модельних сценаріїв аварії на гідровузлі за ймовірністю і ризиком збитків

Нижче наведено ілюстративний приклад оцінки значущості модельних сценаріїв аварії на напірних гідроспорудах гідровузла за ймовірністю і ризиком збитків. Оцінка значущості модельних сценаріїв аварії на гідроспорудах гідровузла здійснювалася за даними, які наведено в табл. 1. Окремі форми аварії, що враховувалися, розглядалися як сумісні незалежні події. Кожній з виділених форм аварії відповідав окремий модельний сценарій, несумісний з іншими модельними сценаріями.

Таблиця 1 – Чисельні характеристики форм аварії на гідровузлі

Чисельні характеристики	Форми аварії F_i					
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
Ймовірності подій, рік ⁻¹	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
Очікувані збитки, млн грн	40	250	1150	2000	2500	3000

Результати чисельних розрахунків ймовірностей модельних сценаріїв, ризиків збитків при їх реалізації та оцінки значущості модельних сценаріїв за ймовірністю та ризиками збитків наведено в табл. 2. Повна ймовірність виникнення аварії на гідроспорудах гідровузла $P(A) = 0,001859$, рік⁻¹ за різними розрахунковими формами F_i , $i = \overline{1,6}$, які розглядалися як сумісні незалежні події, визначалася за формулою логічного об'єднання (диз'юнкції) відповідних аварійних подій:

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^6 [1 - P(F_i)], \quad (13)$$

де $P(F_i)$ – ймовірність реалізації i -ї форми аварії на гідровузлі.

Таблиця 2 – Чисельні характеристики модельних сценаріїв аварії на гідровузлі

Чисельні характеристики	Форми аварії F_i						Всього
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	
Ймовірності подій, рік ⁻¹	0,001427	0,000357	0,000057	0,000014	0,000004	$1,48 \cdot 10^{-7}$	0,001859
Ризики збитків, млн грн рік ⁻¹	0,05708	0,08925	0,06555	0,028	0,01	0,000444	0,250324
Значущість $w_p(A_i)\%$	76,754	19,20	3,07	0,753	0,215	0,008	100
Значущість $w_R(A_i)\%$	22,80	35,65	26,19	11,19	3,99	0,18	100

Повний (сумарний) ризик збитків за модельними сценаріями $A_1 \div A_6$ склав 0,250324 млн грн на рік. Сума ймовірностей модельних сценаріїв при цьому склала $P(A) = 0,001859$, рік⁻¹, що підтверджує коректність розрахунків апостеріорних ймовірностей реалізації модельних сценаріїв аварії як несумісних подій та ризиків збитків – сумарного та за кожним з модельних сценаріїв. При цьому значущість за ймовірністю сценарію A_1 перевищила 76%, тоді як за ризиком склала лише 22,8%. Найбільш значимим за ризиком виявився сценарій A_2 , зі значущістю за ризиком 35,65% і за ймовірністю 19,2%.

5. Висновки

Ідентифікація найбільш значущих модельних сценаріїв аварії за ймовірністю та сценаріїв аварій, обтяжених найбільшими ризиками, дає можливість в короткостроковій перспективі обмежитися розглядом окремих форм аварії серед аварійних подій-наслідків або ж розглядом окремих аварійних подій-причин та умов, що можуть зумовлювати або обумовлювати найбільш ймовірні або найбільш тяжкі за ризиком аварійні процеси на ПНО.

В результаті ранжирування аварійних подій за значущістю з ідентифікацією найбільш ймовірних сценаріїв аварій і сценаріїв аварій, обтяжених найбільшими ризиками, може здійснюватися обґрунтування потреби в додатковій інформації й додаткових дослідженнях відповідних чинників аварійності. Більша мінливість, більша невизначеність факторів та параметрів, як відомо, здатні продукувати більші «внески» цих факторів та параметрів в загальну ймовірність аварії і загальний ризик збитків. Ідентифікація найбільш ймовірних та обтяжених найбільшим ризиком збитків сценаріїв аварій вказують на області, де невизначеність може проявлятися найсильніше, причому в процесі ранжирування аварійних подій і ідентифікації відповідних сценаріїв аварій можуть розкриватися й шляхи подолання цих невизначеностей, а подальші дослідження й отримання нової інформації сприятимуть зниженню «внесків» окремих факторів, параметрів, форм аварії в повну ймовірність аварії на ПНО, сумарний ризик збитків від аварії і, відповідно, їх ефективному зменшенню.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств / Маршалл В. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
2. Хенлі Е.Дж. Надійнісне проектування технічних систем і оцінка ризику / Е.Дж. Хенлі, Х. Кумамото [Пер з англ. за ред. Ю.Г. Зареніна]. – К.: Вища школа, 1987. – 543 с.
3. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams. – Vol. 1. – Q. 76. Beijing-China, 2000. – 896 p.
4. Hartford D.N.D. Risk and Uncertainty in Dam Safety / D.N.D. Hartford, G.V. Baecher // Published by Thomas Telford, 2004. – 401 p.
5. Качинський А.Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи: монографія / А.Б. Качинський; Ін-т проблем національної безпеки. Нац. акад. служби безпеки України. – К.: [б. н.], 2004. – 470 с.
6. Лисиченко Г.В. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління / Г.В. Лисиченко, О.Л. Забулонов, Г.А. Хміль. – К.: Наукова думка, 2008. – 544 с.
7. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ, 2002. – 591 с.
8. Буторин С.Л. Методы анализа безопасности АЭС при авиакатастрофах / С.Л. Буторин, Г.С. Шульман, С.Г. Шульман. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 327 с.
9. Бегун В.В. Метод решения проблемы расчета техногенных рисков / В.В. Бегун, С.А. Вахнин // Управляющие системы и машины, 2014. – №3. – С. 3–9.

10. Стефанишин Д.В. Прогнозування аварій на греблях в задачах оцінки й забезпечення їх надійності та безпеки / Д.В. Стефанишин // Гідроенергетика України, 2011. – № 3–4. – С. 52–60.
11. Стефанишин Д.В. Сценарний підхід к оцелке вероятностей аварий на плотинах / Д.В. Стефанишин // Мониторинг. Наука и безопасность. Устойчивость зданий и сооружений, 2013. – №1 (9). – С. 26–33.
12. Романчук К.Г. Імовірнісне моделювання сценаріїв двох нетипових аварій на гідроенергетичних об'єктах / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Гідроенергетика України, 2014. – № 2–3. – С. 20–25.
13. Стефанишин Д.В. Кількісна оцінка ризиків збитків від аварій на потенційно небезпечних об'єктах / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Математичне моделювання в економіці. – 2016. – № 1. – С. 92–99.
14. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. Пер. с англ. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
15. Kumamoto H. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists / H. Kumamoto, E.J. Henley. New York. IEEE Press, 1996. – 597 p.
16. Стефанишин Д.В. Логіко-імовірнісна оцінка ризику збитків від аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Системні дослідження та інформаційні технології, 2013. – №3. – С. 130–141.
17. Stefanyshyn D.V. Use of the Bayes' approach for assessment of damage risks of system failures / D.V. Stefanyshyn, K.G. Romanchuk // Proc. of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems». July 7–11, 2009. – Saint-Petersburg, Russia. – P.P. 165–169.
18. Романчук К.Г. Про застосування методу Байеса в задачах ідентифікації причин аварій в складних системах / К.Г. Романчук // Problems of decision making under uncertainties. Abstracts of XXII Int. Conf. September 23–27. Foros-Yalta. – К.: 2013. – С. 125.
19. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во С-ПбУ, 2007. – 276 с.
20. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа [Пер. с англ.]. – М.: Наука, 1975. – 462 с.

Стаття надійшла до редакції 11.05.16.