

## АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 004.942

Д.В. СТЕФАНИШИН, К.Г. РОМАНЧУК

### КІЛЬКІСНА ОЦІНКА РИЗИКІВ ЗБИТКІВ ВІД АВАРІЙ НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

***Анотація.** Розглянуто задачу кількісної оцінки ризиків збитків від аварій на потенційно небезпечних об'єктах з врахуванням можливості розвитку аварій за різними сценаріями. Задача вирішується в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей аварійних подій.*

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

#### Вступ

Більшість з об'єктів критичної інфраструктури України, які в значній мірі визначають стан і перспективи її соціально-економічного розвитку, відносяться до потенційно небезпечних об'єктів (ПНО). Це надзвичайно вартісні, відповідальні та складні за системною організацією інженерні об'єкти, які використовуються в різних галузях народного господарства, зокрема в енергетиці, комунальному і технічному водопостачанні, транспорті. Наприклад, важко переоцінити роль гідро- і гідроакumuлюючих електростанцій (ГЕС, ГАЕС) в забезпеченні енергетичної незалежності України, зважаючи на наявний дефіцит енергетичних ресурсів в країні загалом і маневрених зокрема. В об'єднаній енергетичній системі України ГЕС і ГАЕС на Дніпрі і Дністрі є практично єдиним аварійним резервом, який забезпечує електроенергетичну безпеку держави [1]. Водночас напірні гідроспоруди в їх складі – це ПНО, аварії на яких можуть загрожувати життю і здоров'ю людей, приносити масштабні екологічні втрати та економічні збитки [2].

Враховуючи значний аварійний потенціал ГЕС і ГАЕС, атомних і теплових електростанцій (АЕС, ТЕС), хімічних підприємств, газо- і нафтогонів тощо, проблемам їх екологічної, соціальної і економічної безпеки, аналізу й оцінки ризиків їх будівництва і експлуатації в усьому світі приділяють значну увагу [2–7]. Відповідні дослідження ведуться і в Україні, в тому числі і в рамках ризик-орієнтованого напрямку у сфері техногенної

безпеки, що набув особливої популярності в останній час і знайшов своє відображення в роботах В.В. Бегуна, А.Б. Качинського, Г.В. Лисиченко, Н.Д. Панкратової, в роботах інших авторів [8–13] та в наших публікаціях [14–17]. Втім, головною проблемою цього напрямку досліджень, як показує аналіз численних публікацій на заявлену тему, залишається проблема адекватної кількісної оцінки ризиків збитків від техногенних аварій на індивідуальних ПНО, з врахуванням особливостей їх виникнення і перебігу.

Основною метою цієї статті є презентація сценарного підходу до аналізу і оцінки ризиків збитків від аварій на ПНО, який в поєднанні з байєсівським підходом до перетворення ймовірностей аварійних подій дозволяє формалізувати задачу кількісного оцінювання ризиків збитків з врахуванням можливості виникнення техногенної аварії з довільних причин та її розвитку за різними сценаріями. Необхідність такого підходу обумовлюється тим, що, як показує практика, техногенні аварії мають складний системний характер і можуть виникати і розвиватися за різними сценаріями [3, 14] навіть у випадках, коли висхідні причини, обладнання, конструкції й споруди, режими експлуатації ПНО тощо були схожими.

### 1. Загальна постановка задачі

Сценарієм  $A_i$  можливої аварії  $A$  на ПНО назвемо деяку ідеалізовану аварійну подію-припущення, несумісну з іншими визначеними відповідним чином в якості модельних сценаріїв ймовірної аварії  $A$  ідеалізованими аварійними подіями-припущеннями, що формують повну групу подій:

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

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

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

де  $P(A_i)$  – повна (апостеріорна) ймовірність реалізації сценарію  $A_i$  за умови, що аварія  $A$  відбувається;  $P(A_i | A)$  – умовна (байєсівська) ймовірність аварії  $A$  за сценарієм  $A_i$ ;  $P(A)$  – повна ймовірність виникнення аварії  $A$ ;  $P(A | A_i)$  – умовна ймовірність аварії  $A$  за умови реалізації сценарію  $A_i$ .

Повний (сумарний, узагальнений за різними сценаріями) ризик збитків  $R(D, A)$  від аварії  $A$  з врахуванням різних сценаріїв її реалізації  $A_i \in \mathbf{A}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , визначатимемо як [18]:

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

де  $P(A_i)$  – ймовірність реалізації сценарію  $A_i$  за умови, що аварія  $A$  відбувається;  $D(A_i)$  – збиток, якщо аварія  $A$  відбувається за сценарієм  $A_i$ .

## 2. Оцінка ймовірності реалізації модельного сценарію аварії

Нехай аварія на ПНО може виникнути з будь-якої з можливих довільних подій-причин  $E_j \in \mathbf{E}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , і відбуватиметься як подія-наслідок у вигляді однієї з можливих форм  $F_i \in \mathbf{F}$ ,  $i = \overline{1, n}$  (наприклад, як руйнування затвору на бетонній водозливній греблі, руйнування земляної греблі внаслідок переливу води через гребінь, вибух, пожежа тощо).

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 його системної організації, особливостей споруд і конструкцій, функціонування обладнання тощо, в загальному випадку як складної природно-технічної системи  $\mathbf{S}$ , можна визначити за допомогою відповідних структурних функцій надійності (безпеки) [2, 4, 7, 14–17]:

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

Оскільки для кожного з модельних сценаріїв аварії  $A_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , згідно з однією з фундаментальних теорем теорії ймовірностей [19], можна записати:

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

то, якщо визначити ймовірність  $P(A | A_i)$  як «вагу» збитку, пов'язаного з реалізацією форми аварії  $F_i$ , за його ймовірністю  $P(F_i)$ :

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

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

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

При цьому використання імовірнісної міри для  $P(A | A_i)$  у вигляді «ваг» (7) можна виправдати тим, що, по-перше, будь-яка нормалізована система ненегативних величин підкоряється аксіомам теорії ймовірностей [20], по-друге, більш ймовірним подіям в системі довільних подій з порівнюваними наслідками може надаватися більша вага.

### 3. Приклад кількісної оцінки ризиків збитків в рамках сценарного підходу

Кількісна оцінка ризиків збитків від аварії на ПНО здійснювалася за даними, які наведено в табл. 1. Окремі форми аварії розглядалися як сумісні незалежні події. Кожній з виділених форм аварії відповідав модельний сценарій, несумісний з іншими модельними сценаріями.

Таблиця 1 – Чисельні характеристики розрахункових форм аварії на ПНО

Чисельні характеристики	Форми аварії $F_i$								
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$
Ймовірності подій, рік <sup>-1</sup>	0,01	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$
Очікувані збитки, млн грн	5	10	50	400	2500	11500	20000	25000	30000

Результати чисельних розрахунків ризиків збитків від аварії на ПНО наведено в табл. 2. Повна ймовірність  $P(A) = 0,01875$ , рік<sup>-1</sup> виникнення аварії на ПНО за різними розрахунковими формами  $F_i$ ,  $i = \overline{1,9}$ , визначалася за формулою:

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^9 [1 - P(F_i)], \quad (9)$$

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

Таблиця 2 – Чисельні характеристики модельних сценаріїв аварії на ПНО

Чисельні характеристики	Сценарії аварії $A_i$								
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$
Ймовірності подій, рік <sup>-1</sup>	0,0144	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$10^{-8}$
Ризики збитків, млн грн, рік <sup>-1</sup>	0,072	0,036	0,029	0,057	0,09	0,066	0,029	$9 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$

Повний (сумарний) ризик збитків за дев'ятьма модельними сценаріями склав 0,3884 млн грн на рік. Сума ймовірностей модельних сценаріїв при цьому склала  $P(A) = 0,01875$ , рік<sup>-1</sup>, що підтверджує коректність розрахунків апостеріорних ймовірностей реалізації модельних сценаріїв аварії як несумісних подій, та ризиків збитків – сумарного та за кожним з модельних сценаріїв.

#### 4. Деякі принципові узагальнення

За результатами чисельного моделювання сумарних ризиків збитків від аварій згідно із запропонованим підходом були сформульовані наступні твердження.

*Твердження 1.* Якщо хоча б одна з  $n$  аварійних подій-наслідків  $F_i \in \mathbf{F}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , з якими пов'язуються різні збитки  $D(A_i)$  в результаті аварії  $A$  за різними модельними сценаріями  $A_i$ , має «відносну вагу»

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

збитку за ймовірністю його виникнення відмінну від

відповідних «відносних ваг»  $P(A | A_k) = \frac{P(F_k)}{\sum_{i=1}^n P(F_k)}$  збитків за іншими

сценаріями для  $\forall F_k \in \mathbf{F}, k = \overline{1, n}, k \neq i$ , то при  $P(F_i) > P(F_k)$  та  $D(A_i) < D(A_k)$  сумарний (узагальнений) ризик збитків  $R(D, A)$  за сценаріями  $A_i \in \mathbf{A}, i = \overline{1, n}$ , буде:

$$R(D, A) < \sum_{i=1}^n P(F_i) \cdot D(A_i). \quad (10)$$

*Твердження 2.* Якщо аварійні події-наслідки  $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$ , з якими пов'язуються різні збитки  $D(A_i)$  в результаті аварії за сценаріями  $A_i, i = \overline{1, n}$ , є однаково ймовірними і їх ймовірності  $P(F_i) = P(F), i = \overline{1, n}$ , то сумарний ризик збитків  $R(D, A)$  за сценаріями  $A_i \in \mathbf{A}, i = \overline{1, n}$ , аварії буде рівним добутку ймовірності  $P(F)$  на суму збитків  $D(A_i)$ :

$$R(D, A) = P(F) \cdot \sum_{i=1}^n D(A_i). \quad (11)$$

*Твердження 3.* Якщо з різними формами аварії  $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$ , і відповідними їм сценаріями аварії  $A_i, i = \overline{1, n}$ , пов'язуються однакові збитки  $D(A_i) = D(A), i = \overline{1, n}$ , то сумарний ризик збитків  $R(D, A)$  за  $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$  і  $A_i, i = \overline{1, n}$  буде рівним добутку повної ймовірності аварії  $P(A)$  та збитку  $D(A)$ :

$$R(D, A) = P(A) \cdot D(A). \quad (12)$$

## Висновки

Причинно-наслідкові відношення між подіями і станами, що призводили до аварій на ПНО, часто виявляються занадто складними, щоб їх розглядати як статистичні факти в сукупності подібних випадкових подій і явищ та аналізувати в рамках однієї моделі. Відповідно оцінка ризиків можливих аварій на ПНО потребує аналізу індивідуалізованих сценаріїв їх виникнення і розвитку у формі певних логічних побудов та суб'єктивних припущень. Сценарний підхід з використанням евристичних прийомів причинно-наслідкового аналізу, методів системно-структурного і абстрактно-логічного аналізу дозволяє здійснити декомпозицію складної задачі моделювання та кількісної оцінки ризиків збитків аварій на ПНО з врахуванням їх системної організації, особливостей споруд і конструкцій, основ, обладнання. При цьому неструктурована або «слабо структурована» задача оцінки ризиків аварійних подій на ПНО може бути зведена до кількох (за кількістю гіпотетичних сценаріїв) «більш структурованих» задач, що можуть

описуватися простішими математичними моделями з меншим числом визначальних факторів та параметрів, де при оцінці ймовірностей різних аварійних подій і станів, в залежності від наявних даних, можуть використовуватися різні підходи, методи й моделі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловський А.К. Надійні гідроелектростанції – гарант технологічної безпеки та ефективної експлуатації АЕС та ТЕС / А.К. Шидловський, С.І. Поташник, Г.М. Федоренко // Гідроенергетика України, 2005. – № 1. – С. 8–11.
2. 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.
3. Маршалл В. Основные опасности химических производств / Маршалл В. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
4. Kumamoto H. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists / H. Kumamoto, E.J. Henley. New York. IEEE Press, 1996. – 597 p.
5. Мирцхулава Ц.Е. Опасности и риски на некоторых водных и других системах. Виды, анализ, оценка / Ц.Е. Мирцхулава. – Тбилиси: «Мецниереба» («Наука»), 2003. – 538 с.
6. Hartford D.N.D. Risk and Uncertainty in Dam Safety / D.N.D. Hartford, G.B. Baecher // Published by Thomas Telford, 2004. – 401 p.
7. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во С-ПбУ, 2007. – 276 с.
8. 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.
9. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 255 с.
10. 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.
11. Бугорин С.Л. Методы анализа безопасности АЭС при авиакатастрофах / С.Л. Бугорин, Г.С. Шульман, С.Г. Шульман. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 327 с.
12. Панкратова Н.Д. Оцінювання багатofакторних ризиків в умовах концептуальної невизначеності / Н.Д. Панкратова, Н.І. Недашківська // Кибернетика и системный анализ, 2009. – №2. – С. 72–82.
13. Бегун В.В. Метод решения проблемы расчета техногенных рисков / В.В. Бегун, С.А. Вахнин // Управляющие системы и машины, 2014. – №3. – С. 3–9.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Стефанишин Д.В. Сценарний підхід к оцeнке вероятностей аварий на плотинах / Д.В. Стефанишин // Мониторинг. Наука и безопасность. Устойчивость зданий и сооружений, 2013. – №1 (9). – С. 26–33.

18. 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.
19. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа [Пер. с англ.]. – М.: Наука, 1975. – 462 с.
20. Райфа Г. Прикладная теория статистических решений / Г. Райфа, Р. Шлейфер [Пер. с англ. А.К. Звонкина, З.Г. Маймина и Б.Л. Розовского. Под ред. и с пред. Ю.Н. Благовещенского]. – М.: Статистика, 1977. – 360 с.

*Стаття надійшла до редакції 01.12.2015*