

СЦЕНАРНИЙ ПІДХІД ТА МЕТОД БАЙЄСА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ СИСТЕМНИХ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ

К.Г. РОМАНЧУК, Д.В. СТЕФАНИШИН

У межах сценарного підходу до прогнозування техногенних аварій застосовано метод Байєса для оцінювання ризиків системних аварій на гідровузлах. Сформульовано означення і твердження щодо оцінювання ризиків техногенних аварій та здійснено загальну постановку задачі кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах у межах сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей аварійних подій. Показано, що сценарний підхід з використанням байєсівського перетворення ймовірностей дозволяє оцінити повний (сумарний) ризик системної аварії на гідровузлі, яка може відбутися з довільних, у тому числі і сумісних, аварійних подій з різними наслідками, за деякими модельними, несумісними сценаріями її виникнення й перебігу, що формують повну групу подій.

ВСТУП

Гідровузли — інженерні об'єкти, що мають у своєму складі гідротехнічні споруди різного типу і призначення (греблі, водосховища, водоскиди, гідроелектростанції, шлюзи та ін.), які поєднані територіально й функціонально, являють собою складні природно-технічні системи, аварії на яких можуть мати катастрофічні наслідки. У багатьох випадках потенційна небезпека для населення, яке проживає в зонах аварійних впливів гідровузлів, може бути не меншою, ніж для людей, котрі мешкають біля атомних чи хімічних виробництв, з якими спеціалісти і громадськість зазвичай пов'язують проблеми техногенної безпеки [1, 2].

Ураховуючи значний аварійний потенціал гідровузлів, проблемам їх безпечної експлуатації в усьому світі приділяють особливу увагу [3, 4]. Відповідні дослідження ведуться і в Україні [5, 6]. Більшість з цих досліджень, як у світі, так і в Україні, розвиваються в двох основних напрямках, які можна охарактеризувати як традиційний та ризик-орієнтований.

Традиційний напрям досліджень техногенної безпеки гідровузлів орієнтується на глибокий, системний аналіз природних і техногенних чинників аварійності гідроспоруд як технічних систем і об'єктів, виявлення строгих (логічних, функціональних) причинно-наслідкових зв'язків між різними процесами, явищами, подіями, що визначають надійність і безпеку гідроспоруд як у межах детерміністичного (динамічного) підходу, в тому числі і з використанням оригінальних методів індуктивного моделювання, математичної теорії катастроф тощо, так і в межах імовірнісного підходу з використанням методів і моделей стохастичної динаміки, математичної теорії надійності, логіко-імовірнісних методів аналізу надійності і безпеки структурно-складних систем, методів рандомізації детерміністичних моделей гідроспоруд, їх конструкцій та основ [1, 5, 7–14].

Класичні рішення традиційного напрямку досліджень техногенної безпеки складних технічних систем та об'єктів наведено в працях В.В. Болотіна [1]. Найбільше акцентовано ці підходи, у тому числі і щодо гідроспоруд різного типу та призначення, у працях О.І. Вайнберга, М.З. Згуровського, А.Г. Івахненка, Н.Д. Панкратової, А.В. Перельмутера, О.М. Трофимчука, Г.І. Черного, Г. Аугусті та А. Баратта, Х. Кумамото, Ц.Є. Мірцхулави, А.М. Половка, І.О. Рябініна, Е. Дж. Хенлі, С.Г. Шульмана та ін.

Ризик-орієнтований напрям досліджень у галузі техногенної безпеки, що набув поширення останнім часом, розвивається в межах як квазідетерміністичного підходу, так і ймовірнісного підходу з різною інтерпретацією аварійних подій: 1) як статистичних фактів; 2) як подій-припущень з використанням поняття суб'єктивної ймовірності з побудовою і дослідженням різних формальних і неформальних моделей ризику [2–4, 6, 15–17]. Цей напрям, зокрема стосовно напірних гідроспоруд, знайшов розвиток у працях О.Ф. Балацького, В.В. Бегуна, М.М. Биченка, А.Б. Качинського, Г.В. Лисиченка, у публікаціях [6; 18–20], а також Дж. Бехера, А. Бірка, С. Віка, Й.К. Врийлінга, Г. Кройцера, Д. Хартфорда та ін.

Традиційні підходи до аналізу й оцінювання техногенної безпеки дозволяють отримувати фундаментальні рішення, однак через брак інформації та неналежний рівень її достовірності їх досить складно реалізовувати на практиці. У ризик-орієнтованих підходах до аналізу й оцінювання техногенної безпеки враховується як часткова детермінованість явищ та процесів, що визначають стан об'єктів, так і фактори ризику, зумовлені невизначеністю причин і наслідків аварій. При цьому невизначеність інформації про поведінку гідроспоруд і стан навколишнього середовища не є перешкодою для моделювання безпеки і прийняття рішень щодо безпеки гідровузла, де власне ризик в його кількісному вираженні і використовується як кількісна міра надійності та безпеки гідровузла. Однак головною проблемою реалізації ризик-орієнтованого підходу залишається проблема кількісної оцінки ризику аварії на гідровузлі, а саме — проблема коректності цієї оцінки.

СЦЕНАРНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ

Гідровузли, які складаються з гідроспоруд різного призначення, з різними конструкціями і основами, конструктивними елементами, протифільтраційними і дренажними пристроями, механічним устаткуванням та гідроенергетичним обладнанням, автоматичними засобами контролю, керування та регулювання, являють собою складні (синергетичні) системи, розвиток яких відбувається під впливом надзвичайно великої кількості різноманітних факторів — як зовнішніх (навколишнього середовища), так і внутрішніх (системних зв'язків) [2].

Як складні синергетичні системи гідровузли та окремі гідроспоруди у їх складі можуть поєднувати в собі велику кількість різноманітних структурно-функціональних системних одиниць, від працездатності і справності кожної з яких тією чи іншою мірою залежать надійність і безпека гідроспоруди та гідровузла в цілому. При цьому моделювання окремих гідроспоруд і гідровузлів як систем та аварій на них викликає значні труднощі, оскільки ці об'єкти не мають чітко вираженої мережевої структури і окремі структурні одиниці можуть допускати різні ступені формалізації задачі системно-

го моделювання і потребувати різних підходів до її розв'язання. Унікальність гідровузлів як природно-технічних систем, складність їх системної організації, синергізм, невизначеність, різноманітність факторів аварійності — усе це ускладнює моделювання і прогнозування аварій та кількісну оцінку ризику аварій на гідровузлах.

Практика показує, що аварії на гідровузлах мають системний характер і можуть виникати і розвиватися за різними сценаріями [6] навіть у випадках, коли вихідні причини аварій, тип і конструкція споруди, обладнання, вид основи тощо були схожими. Серед основних факторів, що можуть визначати складну поведінку різних об'єктів у складі гідровузлів як систем та умови для реалізації різних сценаріїв аварій на гідровузлах слід виокремити такі [2]:

1) багатофункціональність; гідровузли в цілому, гідроспоруди, їх конструкції, устаткування і обладнання та їх складові частини одночасно можуть виконувати кілька функцій, причому деякі з функцій є сталими, інші — виконуються у разі потреби у випадкові періоди часу;

2) мінливий характер навантажень на гідроспоруди та відповідно функціональних запитів до споруд, устаткування і обладнання, що можуть змінюватися від деяких мінімальних до максимальних розрахункових; при цьому з точки зору системної організації при максимальних розрахункових навантаженнях і функціональних запитах гідровузли та окремі гідроспоруди зазвичай являють собою функціонально не надмірні, не зарезервовані системи, а в цілому діапазон можливих навантажень і функціональних запитів на гідроспорудах є таким, що гідровузли і окремі гідроспоруди можуть мати значну надмірність.

Причинно-наслідкові відношення між різними подіями і станами, що призводили до аварій на гідровузлах, часто виявлялися надто складними, щоб їх розглядати як статистичні факти в сукупності подібних випадкових подій або явищ, які можна аналізувати в межах однієї моделі. І ретроспективний аналіз аварій, які вже відбувалися на гідровузлах, і прогнозування можливих аварій потребують аналізу індивідуалізованих сценаріїв їх виникнення і розвитку у формі певних логічних побудов та суб'єктивних припущень.

Сценарний підхід, у тому числі з використанням евристичних прийомів причинно-наслідкового аналізу, методів системно-структурного і абстрактно-логічного аналізу, дозволяє здійснити декомпозицію складної задачі системного моделювання [2, 6, 18, 19, 21–23]. У результаті сценарного моделювання неструктурована або «слабоструктурована» задача моделювання і прогнозування аварії на гідровузлі може бути зведена до кількох (за кількістю гіпотетичних сценаріїв) «більш структурованих» задач, що можуть описуватися простішими математичними моделями з меншою кількістю визначальних факторів та параметрів і т. ін.

У межах сценарного моделювання і прогнозування аварій на гідровузлах для оцінювання ймовірностей різних аварійних подій, зокрема ймовірнісних розрахунків стійкості та міцності гідроспоруд, їх конструкцій та основ, працездатності устаткування тощо, можуть використовуватися різні підходи, методи й моделі: статистичні методи; методи параметричної та системної теорії надійності; методи рандомізації традиційних детерміністичних моделей та розрахункових схем; логіко-ймовірнісні методи. Сценарний підхід дозволяє поєднати можливості різних методів для оцінювання ймовірностей аварійних подій залежно від наявних даних.

Мета роботи — презентація застосування методу Байєса та байєсівського перетворення ймовірностей аварійних подій у межах сценарного підходу до оцінювання ризиків системних аварій на гідровузлах, що, як буде показано, дозволяє здійснювати формалізоване узагальнення (синтез) ризику системної аварії з урахуванням різних можливих (модельних) сценаріїв її реалізації.

Об'єкт дослідження — сумарні (повні, узагальнені за різними наслідками) ризики системних аварій на гідровузлах. **Предметом дослідження** є методи оцінювання ризиків системних аварій на гідровузлах з урахуванням можливості різних наслідків аварії залежно від різних сценаріїв її реалізації.

ЗАГАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ: ОЗНАЧЕННЯ ТА ТВЕРДЖЕННЯ

Означення 1. Сценарієм A_i системної аварії A назвемо деяку ідеалізовану аварійну подію-припущення, несумісну з іншими визначеними відповідним чином як k -х модельних сценаріїв системної аварії ідеалізованими аварійними подіями-припущеннями, що формують повну групу подій:

$$P(A_i) = P(A_i | A)P(A);$$

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

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

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

Означення 2. Повний (сумарний) ризик збитків $R(D, A)$ від системної аварії A з урахуванням різних сценаріїв її реалізації $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$, визначатимемо як

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

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

Нехай аварія в системі \mathbf{S} 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 $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$.

Ймовірності $P(F_i)$ подій-наслідків $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, та ймовірність $P(A)$ системної аварії A залежно від складу, особливостей структури, функціонування гідровузла як системи визначатимемо за допомогою відповідних структурних функцій надійності (безпеки) [2, 6, 11, 12, 19, 23]:

$$\Psi(\mathbf{S} | F_i) : \mathbf{E} \rightarrow F_i, i = \overline{1, n}; \Psi(\mathbf{S}) : \mathbf{E} \rightarrow A. \quad (2)$$

Для кожного зі сценаріїв аварій, $i = \overline{1, n}$, згідно з однією з фундаментальних теорем теорії ймовірностей [24] можна записати:

$$P(A | A_i)P(A_i) = P(A_i | A)P(A). \quad (3)$$

Визначимо ймовірність $P(A | A_i)$ як «вагу» відповідного збитку (наслідку, форми системної аварії) F_i за ймовірністю його реалізації $P(F_i)$:

$$P(A | A_i) = \frac{P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}, \quad (4)$$

де використання імовірнісної міри щодо «ваг» (3) можна виправдати тим, що будь-яка нормалізована система від'ємних величин підкоряється аксіомам теорії ймовірностей [25].

Тоді з урахуванням виразу (4) у формулах (1) і (2) імовірність $P(A_i)$ може прийматися рівною $P(F_i)$, звідки

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

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 системної аварії за відповідними сценаріями A_i має «відносну вагу» $P(A | A_i) = \frac{P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}$ збитку з імовірністю 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 $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$, системної аварії становитиме:

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

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 системної аварії за відповідними сценаріями A_i , $i = \overline{1, n}$, є однаково ймовірними і їх імовірності $P(F_i) = P(F)$, $i = \overline{1, n}$, то сумарний ризик збитків $R(D, A)$ за сценаріями $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$, системної аварії буде дорівнювати добутку ймовірності $P(F)$ на суму збитків $D(A_i)$:

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

Твердження 3. Якщо з різними аварійними подіями-наслідками $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, і відповідними 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 аварійними подіями-наслідками $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, і відповідними сценаріями A_i , $i = \overline{1, n}$, дорівнюватиме добутку повної ймовірності системної аварії $P(A)$ та збитку $D(A)$:

$$R(D, A) = P(A)D(A).$$

УТОЧНЕННЯ УМОВНИХ ІМОВІРНСТЕЙ $P(A | A_i)$

Аварійні події вигляду $(A | A_i)$, $i = \overline{1, n}$ — це складні аварійні події («виходи»), які загалом є більш невизначеними, ніж відповідні їм «входи» $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, що пов'язуються з формами та видами аварій на гідропорудах тощо. На практиці ймовірності «виходів» $(A | A_i)$, $i = \overline{1, n}$, можуть бути отримані лише опосередковано, наприклад, як імовірності реалізації деяких подій-припущень (порушення критеріїв міцності, стійкості гідропоруд в аварійних ситуаціях і т. ін.), які своєю чергою досить часто також є довільними (сумісними) подіями.

У практичних розрахунках, окрім прямого «зважування» подій за ймовірністю у вигляді виразу (4), найпростіша залежність між ймовірностями $P(A | A_i)$ і $P(F_i)$ може встановлюватися згідно з відомим правилом Фішберна, яке зазвичай використовується для системи невизначених показників, що не є ймовірностями:

$$P(F_i) = \frac{2(n-i+1)}{(n+1)n},$$

де $P(F_i)$ — «вага» упорядкованої згідно з її рангом за спаданням значущості аварійної події $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$.

Формувати повні групи подій серед аварійних подій-умов перебігу аварій з метою реалізації методу Байєса з урахуванням більше ніж двох подій однієї й тієї ж природи, які характеризуються різними ймовірностями перевищення розрахункових характеристик, можна такими трьома способами.

Перший спосіб — імовірності перевищення розрахункових характеристик подій-умов визначаються з точністю, яка не викликає сумнівів у їх однаковій достовірності.

Другий спосіб — ураховується статистична достовірність гіпотези, наприклад щодо закону розподілу, за яким визначаються ймовірності перевищення розрахункових характеристик подій-умов. Нехай ця достовірність $v(\chi^2)$ устанавлюється за результатами перевірки гіпотез за критерієм χ^2 К. Пірсона.

Третій спосіб — кожній з подій-умов приписується певна «вага» і при нормуванні ймовірність перевищення кожної аварійної події-умови має оцінюватися з урахуванням деякого «вагового» коефіцієнта γ_w .

Уведення коефіцієнта γ_w тут можна пояснювати тим, що, по-перше, з менш імовірними подіями порівняно з більш імовірними подіями може пов'язуватися більша небезпека, по-друге, характеристики менш імовірних екстраординарних подій можуть оцінюватися з більшою похибкою.

Нехай є J довільних аварійних подій-умов $C_j, j = \overline{1, J}$, що мають включатися в повну групу.

Виконаємо ранжування та нумерацію подій згідно з правилом

$$P(C_1) < P(C_2) < \dots < P(C_j) < \dots < P(C_{j-1}) < P(C_j), \quad (5)$$

де $P(C_j)$ — імовірності перевищення j -х подій, $j = \overline{1, J}$.

Згідно з першим способом нормовані значення відповідних імовірностей $P(C_1), P(C_2), P(C_j), P(C_j)$ будуть такими:

$$P_i(C_1) = P(C_1); P_i(C_2) = P(C_2) - P(C_1); \dots; P_i(C_j) = P(C_j) - P(C_{j-1}).$$

Згідно з другим і третім способами нормування виконується за формулою

$$P_n(C_j) = \frac{\mu P^*(C_j)}{\sum_{j=1}^J P^*(C_j)},$$

де ймовірності $P^*(C_j)$:

$$P^*(C_j) = (P(C_j) - P(C_{j-1})) (2 - v(\chi^2));$$

$$P^*(C_j) = P(C_j) \gamma_{w,j} - P(C_{j-1}) \gamma_{w,j-1},$$

$P(C_j), P(C_{j-1})$ — імовірності перевищення j -ї та $j-1$ -ї подій-умов, імовірності перевищення характеристик яких нормуються, $j = \overline{1, J}$; J — загальна кількість подій-умов, що включаються в повну групу подій; μ — міра нормування, яка у випадку, якщо $\sum_{j=1}^J P^*(C_j) \leq 1$, береться такою, що дорів-

нює $\sum_{j=1}^J P^*(C_j)$, якщо $\sum_{j=1}^J P^*(C_j) > 1$, то дорівнює одиниці або 100 %;

$\nu(\chi^2)$ — статистична достовірність закону розподілу, за яким визначаються ймовірності перевищення розрахункових характеристик подій-умов, яка встановлюється за результатами перевірки гіпотез згідно з критерієм χ^2 К. Пірсона; $\gamma_{w,j}$ — «ваговий» коефіцієнт, який для ранжованих згідно з правилом (5) подій може визначатися за формулою

$$\gamma_{w,j} = 1 + \lg \left(\frac{P(C_{j+1})}{P(C_j)} \right), \quad j = \overline{1, J}.$$

Більш імовірним «входам» (формам, видам аварії) надаватиметься нелінійно зростаюча «вага» (більший пріоритет) при визначенні «виходів» — модельних сценаріїв системної аварії на гідровузлі.

ВИСНОВКИ

Оцінювання ризику системних аварій на гідровузлах є складними, неструктурованими (або «слабоструктурованими») задачами, обтяженими як параметричною, так і структурною невизначеністю. Коректне розв'язання задач кількісної оцінки ризику системних аварій на гідровузлах з урахуванням різних факторів, як природних, так і техногенних, можливе в межах сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей аварійних подій-причин. Сценарне моделювання в поєднанні з методом Байєса дає змогу поєднувати можливості різних методів та моделей, виконувати формальну кількісну оцінку ризиків системної аварії, отриманих за різними модельними сценаріями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
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 им. Б.Е. Веденеева, 2002. — 591 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.B. Vaecher // Published by Thomas Telford, 2004. — 401 p.
5. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы / А.И. Вайнберг. — Х.: Тяжпромавтоматика, 2008. — 304 с.
6. 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.
7. Згуровский М.З. Информационный подход к анализу и управлению проектными рисками / М.З. Згуровский, И.И. Коваленко, К. Кондрак, Э. Кондрак // Проблемы управления и информатики. — 2000. — № 4. — С. 148–156.

8. *Мирицхулава Ц.Е.* Опасности и риски на некоторых водных и других системах. Виды, анализ, оценка / Ц.Е. Мирицхулава. — Тбилиси: Мецниереба («Наука»), 2003. — 538 с.
9. *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.
10. *Перельмутер А.В.* Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. — М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2007. — 255 с.
11. *Половко А.М.* Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. — 2-е изд. перераб. и доп. — СПб: БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.
12. *Рябинин И.А.* Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. — СПб.: Изд-во С-Петербург. ун-та, 2007. — 276 с.
13. *Трофимчук А.Н.* Надёжность систем сооружение – грунтовое основание в сложных инженерно-геологических условиях / А.Н. Трофимчук, В.Г. Черный, Г.И. Черный. — К.: ПолграфКонсалтинг, 2006. — 248 с.
14. *Kumamoto H.* Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists / H. Kumamoto, E.J. Henley. — New York: IEEE Press, 1996. — 597 p.
15. *Бегун В.В.* Метод решения проблемы расчета техногенных рисков / В.В. Бегун, С. А. Вахнин // Управляющие системы и машины. — 2014. — № 3. — С. 3–9.
16. *Качинський А.Б.* Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи: моногр. / А.Б. Качинський; Ін-т проблем нац. безпеки. Нац. акад. служби безпеки України. — К.: [б. н.], 2004. — 470 с.
17. *Лисиченко Г.В.* Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління / Г.В. Лисиченко, О.Л. Забулонов, Г.А. Хміль. — К.: Наук. думка, 2008. — 544 с.
18. *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.
19. *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.
20. *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. 165–169.
21. *Загірська І.О.* Методика побудови сценарного аналізу із використанням байєсівських методів / І.О. Загірська, П.І. Бідюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Інформаційні системи та технології. — 2012. — № 8 (84). — С. 137–142.
22. *Панкратова Н.Д.* Моделювання альтернатив сценаріїв процесу технологічного передбачення / Н.Д. Панкратова, В.В. Савастьянов // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2009. — № 1. — С. 22–35.
23. *Стефанишин Д.В.* Сценарний підхід к оцінці вероятностей аварій на плотинах / Д.В. Стефанишин // Мониторинг. Наука и безопасность. Устойчивость зданий и сооружений. — 2013. — № 1 (9). — С. 26–33.
24. *Пойа Д.* Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа [Пер. с англ. И.А. Вайнштейна]. — М.: Наука, 1975. — 462 с.
25. *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.

Надійшла 20.05.2016