

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО
ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ**

На правах рукопису

Романчук Катерина Геннадіївна

УДК 004.942 ; 519.226.3 ; 519.87 : (504.75 + 626/627)

**МЕТОД БАЙЄСА ПРИ ОЦІНЦІ РИЗИКІВ АВАРІЙ ТА УПРАВЛІННІ
БЕЗПЕКОЮ НА ГІДРОВУЗЛАХ**

Спеціальність

05.13.06 – Інформаційні технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

доктор технічних наук,

доцент Д.В. Стефанишин

Київ-2017

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМАТИКА ОЦІНКИ РИЗИКІВ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ В КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ГІДРОСПОРУД	14
1.1. Актуальність проблеми кількісної оцінки ризиків аварій на гідротехнічних спорудах гідровузлів України	14
1.2. Задачі дослідження ризиків техногенних аварій	21
1.3. Існуючі підходи до оцінки ймовірностей техногенних аварій, методи і моделі	25
1.3.1. Статистичні оцінки ймовірностей аварій на гідровузлах	26
1.3.2. Методи та моделі математичної теорії надійності	28
1.3.3. Рандомізація детерміністичних моделей та розрахункових схем	35
1.3.4. Логіко-імовірнісні методи	40
1.3.5. Сценарний підхід до прогнозування техногенних аварій	46
1.4. Проблеми кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах, мета та наступні задачі дослідження	48
1.5. Висновки до розділу 1	51
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА РИЗИКІВ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ НА ОСНОВІ МЕТОДУ БАЙЄСА	53
2.1. Загальні положення, означення та твердження	53
2.2. Загальна постановка задачі кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах на основі методу Байєса	57
2.3. Приклад оцінки сумарного ризику збитків від аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1	63
2.3.1. Оцінка ймовірностей аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1	64
2.3.2. Оцінка сумарного ризику збитків від аварійного виливу води	71

2.4. Задача імовірнісного прогнозування видатного затору в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла при заповненні водосховища на основі історичних даних в рамках байєсівського підходу	73
2.5. Деякі узагальнення байєсівського підходу до оцінки ризику аварій на гідровузлах	84
2.5.1. Використання байєсівських мереж	84
2.5.2. Оцінка ймовірностей аварійних подій виду $(A A_i)$ та формування повних груп серед подій-умов, що обумовлюють перебіг аварій	86
2.6. Висновки до розділу 2	89
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТЕЙ СИСТЕМНИХ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ БАЙЄСА	91
3.1. Оцінка ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв	92
3.2. Оцінка ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження	101
3.3. Оцінка ймовірностей сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскаді гідроспоруд	107
3.4. Оцінка ймовірностей системних аварій на гідровузлах внаслідок відмов водоскидних споруд за пропускною здатністю	117
3.4.1. Оцінка ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням	121
3.4.2. Оцінка ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як неоднорідної системи з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів	123
3.5. Висновки до розділу 3	128
РОЗДІЛ 4. УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ГІДРОВУЗЛІВ НА ОСНОВІ БАЙЄСІВСЬКИХ ОЦІНОК РИЗИКІВ АВАРІЙ	129
4.1. Загальні принципи та першочергові задачі управління безпекою гідровузлів з врахуванням ризиків аварій	129

4.2. Ранжирування аварійних подій на гідровузлі за значущістю в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей	135
4.3. Обґрунтування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлах та вибір розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності	148
4.4. Задача про оптимізацію складу зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв при заданому рівні її надійності	165
4.5. Висновки до розділу 4	172
ВИСНОВКИ	173
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	176
АНОТАЦІЇ	198
ДОДАТКИ	202

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне природокористування, інженерна діяльність, транспорт та будівництво, енергетика, розвиваються на системному рівні, коли техногенна (інженерна, технічна), соціальна (соціально-економічна) й природна (територіальна, ресурсна, екологічна тощо) складові тісно переплітаються і, взаємодіючи між собою, породжують нове об'єктивне явище – складні природно-технічні системи (ПТС).

Серед ПТС виділяються такі унікальні й водночас широко поширені інженерні об'єкти – як гідровузли та каскади гідровузлів, що мають у своєму складі різні гідроспоруди (греблі, водосховища, водоскиди, гідроелектростанції та ін.), поєднані територіально й функціонально, протиповіневі дамби й протизсувні споруди тощо. В багатьох випадках – це надзвичайно складні територіальні ПТС каскадного типу, що утворюються ланцюжками підсистем, які мають висотно-географічне положення на місцевості та зв'язуються в каскади маси й енергії. Розвиток гідровузлів як складних систем відбувається під впливом настільки великої кількості факторів, а можливі їх стани визначаються настільки значною кількістю параметрів, що всі вони принципово не можуть бути повноцінно врахованими в рамках класичних динамічних моделей. Кількість таких факторів, станів і параметрів може бути практично необмеженою. При цьому більшість з факторів і параметрів, що визначають допустимі стани гідровузлів як систем, набувають випадкових значень, а інколи є принципово невизначеними. Характерною особливістю гідровузлів як ПТС є можливість розвитку на них природно-техногенних аварій за різними сценаріями, в тому числі і в результаті системних відмов, поєднань як природних, так і техногенних причин, часто, з важко передбачуваними наслідками та механізмами їх реалізації. Все вищесказане суттєво ускладнює задачі оцінки ризиків аварій на гідровузлах, оцінки їх надійності й безпеки, управління надійністю та безпекою гідровузлів при їх проектуванні, будівництві, експлуатації. Ці задачі можуть ускладнювати-

ся і тим, що ресурси, які можуть бути використані для забезпечення надійності й безпеки гідровузлів, у більшості випадків обмежені. Ресурсні обмеження можуть безпосередньо впливати на стан гідровузла як ПТС, стани окремих гідроспоруд, на готовність персоналу належно виконувати свої функції, на працездатність устаткування, надійність автоматичних систем регулювання, систем проти аварійного захисту тощо. Тому в кожному конкретному випадку вибір на користь того чи іншого рішення з точки зору мінімізації сукупного ризику функціонування гідровузла як потенційно небезпечної системи має здійснюватися з врахуванням пріоритету різних ризиків. Однак для того, щоб цей вибір був раціональним, ризики аварій на гідровузлах повинні оцінюватись адекватно, а саме – в контексті системної задачі, з використанням системних моделей та всієї доступної інформації – апріорної, апостеріорної, як щодо ймовірностей подій, що вже відбувалися на гідровузлі та на аналогічних об'єктах, так і ймовірностей щодо аварійних подій-припущень й гіпотетичних сценаріїв аварій, які можна отримати лише в рамках логіко-імовірнісного сценарного моделювання. Розробці методів, що ґрунтуються на сценарному підході з використанням байєсівських процедур перетворення ймовірностей, для оцінки ймовірностей сценаріїв системних аварій на гідровузлах та управління надійністю й безпекою гідровузлів як складних систем на основі оптимізації кількісних оцінок системних ризиків від гіпотетичних аварій, присвячена дана дисертаційна робота.

В ній розв'язується актуальне науково-практичне завдання щодо кількісної оцінки ризиків аварій з метою обґрунтування надійності й безпеки гідровузлів як складних синергетичних систем, що дозволить забезпечувати належні рівні надійності й безпеки окремих гідровузлів та їх каскадів на основі оптимізації системних ризиків аварій в умовах існуючих ресурсних обмежень.

Відсутність серйозних аварій на вітчизняних гідровузлах, особливо великих, до яких відносяться гідроспоруди Дніпровського і Дністровського каскадів гідроелектростанцій, не повинна заспокоювати інженерів. Вітчизняні гідроспоруди нічим особливим не відрізняються від гідроспоруд, що будуються і експлуатуються в світі. Проблема безпеки гідроспоруд у складі гідровузлів існує

незалежно від того відбувалися аварії на них в минулому чи ні. З часом, внаслідок старіння вже побудованих гідроспоруд, та зі збільшенням кількості нових гідроспоруд, в тому разі і гідроспоруд у приватній власності, проблема аварійності на гідровузлах, як показує практика, лише актуалізуватиметься. При цьому на гідроспорудах можуть виникати і аварії за сценаріями, що раніше не мали місце, з невідомих або малоімовірних на разі причин. Все це обумовлює актуальність проблеми кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах як системних аварій з врахуванням різних аварійних подій-припущень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках науково-дослідних робіт за двома темами, що виконувалися Інститутом телекомунікацій і глобального інформаційного простору (ІТГІП): 1) «Розробка аналітично-інформаційної системи прогнозування надзвичайних ситуацій на прирічкових територіях з використанням сучасних геоінформаційних технологій» (2010-2012 рр., № держреєстрації 0110U002717); 2) «Розробка аналітично-інформаційної системи прогнозування аварій та надзвичайних ситуацій на гідровузлах з використанням сучасних геоінформаційних технологій» (2013-2015 рр., № держреєстрації 0112U007446). Результати досліджень використовувалися в Національному університеті водного господарства та природокористування (НУВГП) при імовірнісному прогнозуванні аварій та оцінці ризику аварій на гідроспорудах водосховища охолоджувача Хмельницької АЕС, Каховської ГЕС та Дністровської ГЕС-1.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка методів для побудови інформаційної технології імовірнісного прогнозування аварій та кількісної оцінки ризиків аварій в задачах оцінки надійності і безпеки та управління надійністю і безпекою гідровузлів як складних систем з врахуванням ризику в рамках сценарного підходу на основі байєсівських процедур перетворення ймовірностей.

Під прогнозуванням аварії та кількісною оцінкою ризику аварії на гідровузлі надалі будемо розуміти науково обґрунтовані судження про ймовірність техногенної події на гідровузлі, що класифікується як аварія, та величину ймо-

вірних втрат (ризиків збитків) внаслідок відповідної аварії, які отримано з певним рівнем формалізації на основі аналізу наявних даних про стан і функціонування гідропоруд гідровузла, їх конструкцій, основ, конструктивних елементів, устаткування та обладнання, про особливості розвитку природних, техногенних та ін. процесів і явищ в навколишньому середовищі.

У відповідності до мети було поставлено такі завдання дослідження:

– проаналізувати сучасні підходи, методи та моделі для імовірнісного прогнозування аварій, оцінки безпеки та управління безпекою гідровузлів в рамках досліджень в області техногенної безпеки з врахуванням особливостей гідровузлів як складних синергетичних систем;

– розвинути сценарний підхід до імовірнісного прогнозування аварій та кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах в контексті використання байєсівського перетворення ймовірностей;

– застосувати метод Байєса до імовірнісного прогнозування нетипових системних аварій на гідровузлах, пов'язаних з відмовами автоматичних засобів регулювання; розв'язати задачу оцінки ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та задачу оцінки ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження;

– в рамках байєсівського підходу удосконалити метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням та розробити метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як неоднорідної системи із врахуванням пріоритету виконання різних функціональних запитів;

– на основі сценарного підходу до оцінки ризику збитків від аварій з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розробити метод оцінки значущості за Фусселем – Веслі аварійних подій на гідровузлі з метою їх ранжирування за пріоритетом безпеки;

– в рамках сценарного підходу до оцінки ризиків збитків з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розробити метод обґрунтування зліченої розрахункової множини аварійних подій на гідровузлі та вибору розраху-

нкових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику.

Об'єктом дослідження є ризики аварій на гідровузлах, надійність й безпека функціонування гідровузлів як складних природно-технічних систем в контексті ризику.

Предметом досліджень є методи для оцінки ймовірностей аварій та кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах з метою оцінки їх надійності і безпеки і управління їх надійністю та безпекою з врахуванням ризику.

Методи дослідження. Відповідно до сформульованої мети роботи залучалися такі методи дослідження: методи системно-структурного та абстрактно-логічного аналізу, методи системного аналізу, методи теорії ймовірностей та математичної статистики, методи математичної теорії надійності і математичної теорії ризику, методи математичної логіки та теорії прийняття рішень.

Коректний вибір методів дослідження забезпечив достовірність отриманих результатів і висновків.

Наукова новизна одержаних результатів. Внаслідок розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач отримано такі нові наукові результати:

– отримав подальший розвиток сценарний підхід до оцінки ймовірностей аварій та оцінки ризиків аварій на гідровузлах з використанням байєсівського перетворення ймовірностей, що дозволило розв'язувати задачу кількісної оцінки повного (сумарного) ризику збитків від аварії на гідровузлі з врахуванням різних модельних сценаріїв як несумісних аварійних подій-припущень; вперше сформульовано твердження про несумісність модельних сценаріїв аварій;

– вперше застосовано метод Байєса до імовірнісного прогнозування нетипових сценаріїв системних аварій на гідровузлах, пов'язаних з відмовами автоматичних засобів регулювання; розв'язано задачу оцінки ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та задачу оцінки ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження;

– в рамках байєсівського підходу удосконалено метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним

функціональним резервуванням; вперше розроблено метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускну здатністю як неоднорідної системи з врахуванням пріоритету виконання різних функціональних запитів;

– вперше на основі сценарного підходу до оцінки ризику збитків від аварій з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розроблено метод оцінки значущості за Фусселем – Веслі аварійних подій на гідровузлі за ймовірністю та ризиком збитків з метою їх ранжирування за пріоритетом безпеки;

– вперше в рамках сценарного підходу до оцінки ризиків збитків з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розроблено метод обґрунтування зліченної множини модельних сценаріїв аварії на гідровузлі та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується адекватністю інформаційних та математичних моделей аварійних ситуацій на гідровузлах, коректністю постановок задач імовірнісного прогнозування аварій та результатами ретроспективного прогнозування аварій, що мали місце на гідровузлах.

Наукове значення роботи. Результати роботи мають наукове значення для розвитку методів імовірнісного прогнозування аварій та кількісної оцінки ризиків збитків від аварій на гідровузлах для цілей оцінки їх надійності і безпеки та управління їх надійністю і безпекою в умовах ресурсних обмежень у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та удосконалено методи, які дозволяють здійснювати імовірнісне прогнозування аварій та кількісну оцінку ризиків збитків від аварій на індивідуальних гідровузлах з метою оцінки їх надійності і безпеки та управління їх надійністю і безпекою.

Розроблені і вдосконалені методи впроваджено і використовувались:

– у навчальному процесі НУВГП на кафедрі «Гідротехнічне будівництво» з дисциплін «Надійність гідротехнічних об'єктів», «Управління режимами

роботи гідротехнічних споруд та гідроенергетичних об'єктів» та в процесі дипломного проектування при підготовці магістерських робіт (додаток А);

– на кафедрі гідротехнічного будівництва НУВГП при проведенні науково-дослідної роботи (НДР) «Розробка проекту з уточненням умов експлуатації гідротехнічних споруд ВП ХАЕС, проведення проектно-вишукувальних робіт з використанням бурильних установок» (дог. № 2-74) в частині оцінки значущості базових аварійних подій, що можуть призвести до аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС (додаток Б);

– на кафедрі гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин НУВГП при проведенні НДР «Робота фахівців НУВГП в складі міжвідомчих комісій з обстеження стану гідротехнічних споруд та їх механічного обладнання гідроелектростанцій ПАТ Укргідроенерго» (дог. № 2-130) в частині кількісної оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах Каховської ГЕС і Дністровської ГЕС-1 (додаток В);

– в ПАТ «Укргідропроєкт» при оцінці надійності і безпеки гідроспоруд Дністровської ГЕС-1 і Дністровської ГАЕС в частині формування зліченної множини розрахункових аварійних подій на гідровузлі та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності (додаток Г).

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дослідження одержані автором самостійно. В роботах, виконаних у співавторстві, здобувачу належить:

– аналітичний огляд сучасних підходів і методів для оцінки ризику аварій на гідровузлах й оцінки їх безпеки з врахуванням ризику [117, 133, 149, 150];

– формулювання означень і тверджень, що стосуються оцінки ризику збитків від аварій на основі сценарного підходу та методу Байєса [117, 133, 149, 166, 167, 221, 223, 230];

– розробка алгоритмів і логіко-ймовірнісних моделей для оцінки ймовірностей аварій на гідровузлах, проведення чисельних розрахунків та імітаційного моделювання з аналізом отриманих результатів [119-122, 133, 144, 145, 149, 150, 156, 158, 160, 222];

– розв'язання задачі оцінки ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та задачі оцінки ймовірності аварії в си-

стемі з автоматичним регулюванням навантаження [118, 119, 127, 144, 156, 158, 160, 222];

– моделювання гідроспоруд як систем, формулювання принципів системного аналізу при виборі модельних сценаріїв аварій та розробка сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскадах гідровузлів [120-122, 150, 161];

– розробка алгоритмів для ідентифікації значущих аварійних подій за ризиком збитків, обґрунтування зліченної множини розрахункових аварійних подій на гідровузлах та вибору розрахункових максимальних проектних подій екстремального характеру малої ймовірності [117, 123, 129, 130, 132, 149, 153, 165, 166, 229].

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертації доповідались та обговорювались на:

– XI-IX, XIV-XIX, XXII-XXVI Міжнародних конференціях і семінарах «Problems of decision making under uncertainties» (м. Алушта, 2006 р.; м. Чернівці, 2007 р.; м. м. Київ, Рівне, 2008 р.; Крим, с. Новий Світ, 2008 р.; с. Східниця, 2009 р.; м. Кам'янець-Подільський, 2009 р.; м. Львів, 2010 р.; м. Ялта, 2010; с. Східниця, 2011 р.; м. Ялта, 2011 р.; м. Мукачеве, 2012 р.; Крим, с. Форос, м. Ялта, 2013 р.; м. Мукачеве, 2014 р.; Східниця, 2015 р.; Одеса, 2015 р.);

– XII, XIV Міжнародних конференціях ім. М. Кравчука (м. Київ, НТУУ «КПІ», 2008 р., 2012 р.);

– XIV, XV Міжнародних конференціях «Dynamical system modeling and stability investigation» (м. Київ, КНУ ім. Т. Шевченка, 2009 р., 2011 р.);

– IX-XI Міжнародних наукових школах «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems» (Санкт-Петербург, Росія, Інститут проблем машин РАН, 2009 р., 2010 р., 2011 р.);

– I-III Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Системний аналіз. Інформатика, управління» (м. Запоріжжя, КПУ, 2010 р., 2011 р., 2012 р.);

– XII-XIV, XVI, XVII Міжнародних науково-технічних конференціях «Системний аналіз та інформаційні технології» (м. Київ, ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2010 р., 2011 р., 2012 р., 2014 р., 2015 р.);

– VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології в науці, економіці і освіті» (м. Черкаси,

ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2011 р.); I та II Українських конференціях «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (м. Рівне, РДГУ, 2013 р., 2015 р.); XII, XIV Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях» (с. Рибаче, Крим, 2013 р.; Київ, 2015 р., 2016 р.); V Всеукраїнській науково-практичній конференції за міжнародною участю «Інформатика та системні науки» (м. Полтава, 2014 р.); VI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації» (м. Кам'янець-Подільський, К-ПНУ ім. І. Огієнка, 2014 р.); V Всеукраїнському з'їзді екологів з міжнародною участю (м. Вінниця, ВНТУ, 2015 р.); III-V Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» (м. Чернівці, ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2014 р., 2015 р., 2016 р.).

Публікації. Всього за темою дисертаційної роботи опубліковано 52 праці. Основні положення та результати дисертації викладено у 29 наукових працях. Серед них 15 статей у фахових наукових виданнях, що внесені до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого Міністерством освіти і науки України, у тому числі 2 у виданнях, що реферуються в міжнародних наукометричних базах даних; 4 статті у закордонних профільних збірниках наукових праць; 3 статті у інших профільних виданнях; 7 тез доповідей на профільних міжнародних наукових та науково-технічних конференціях; 5 праць опубліковано без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 206 сторінках друкованого тексту, містить 27 рисунків по тексту, 30 таблиць, список використаних джерел із 237 найменувань на 22 сторінках, анотації на 4 сторінках та 4 додатки на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1
ПРОБЛЕМАТИКА ОЦІНКИ РИЗИКІВ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ
В КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ГІДРОСПОРУД

1.1. Актуальність проблеми кількісної оцінки ризиків аварій на гідротехнічних спорудах гідровузлів України

Історія гідротехнічного будівництва налічує численні випадки аварій на гідротехнічних спорудах гідровузлів, серед них були і аварії, які залишились в людській пам'яті як приклади великих техногенних катастроф, що призвели до важких матеріальних втрат та загибелі великої кількості людей (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Приклади деяких найбільш відомих катастрофічних аварій на гідроспорудах гідровузлів в світі [1, 13, 28, 36, 65, 154, 161, 164]

Гідровузол, країна	Висота споруд, м	Рік аварії	Короткий опис аварії: її причин та особливостей виникнення і протікання	Кількість жертв
1	2	3	4	5
Дейл Дайк, Англія	29,0	1864	Внутрішня ерозія і прорив земляної греблі внаслідок суфозії при першому наповненні водосховища	270
Саус Форк, США	21,5	1889	Розмив земляної греблі в результаті переливу води через її гребінь під час повені через недостатню пропускну здатність водоскиду	2500
Глено, Італія	52,0	1923	Руйнування контрфорсів бетонної багатоаркової греблі при переповненні водосховища з переливом води під час повені	500

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
Сент Френ- сіс, США	62,6	1928	Руйнування бетонної арково-гравітаційної греблі у складі гідротехнічного комплексу внаслідок хімічної суфозії в скельних породах основи і берегів	400
Маль- пасе, Фран- ція	66,0	1959	Руйнування аркової греблі через порушення стійкості скельного лівобережного берегового упору арки при переповненні водосховища під час повені	421
Оруш, Брази- лія	54,0	1960	Розмив тіла кам'яно-земляної греблі при будівництві під час повені через недостатню пропускну здатність тимчасового водоскиду	1000
Ва- йонт, Італія	262,0	1963	Утворення хвилі витіснення типу цунамі на водосховищі внаслідок катастрофічного зсуву з переливом води через аркову греблю	2600
Бян- цяо, Китай	54,0	1975	Каскадна аварія, яка розпочалася з руйнування під час повені розташованої вище за течією земляної греблі Шимантань, з руйнуванням земляної греблі Бянцяо	26000
Мач- ху-2, Індія	26,0	1979	Розмив земляної греблі в результаті переливу води через її гребінь через переповнення водосховища внаслідок несправності механічного обладнання водоскиду	2000
Саяно- Шу- шен- ський, Росія	242,0	2009	Аварія на гідроелектростанції внаслідок вібрацій та розгерметизації агрегату №2, що розвинулася до катастрофи через відмову автоматики, яка не спрацювала на перекриття напірного тракту аварійним затвором	75

В багатьох відношеннях потенційна небезпека для населення, яке проживає в нижніх б'єсах гідровузлів, може бути не меншою, ніж для людей, що живуть біля атомних чи хімічних виробництв, з якими спеціалісти й громадськість зазвичай пов'язують проблеми техногенної безпеки [7, 11, 24, 28, 39, 58, 63, 77, 84, 86, 136, 190, 194, 209, 213]. Аварії на гідровузлах можуть загрожувати життю і здоров'ю людей, завдавати значних економічних збитків, наносити шкоду довкіллю і призводити до руйнування об'єктів народного господарства, в тому числі і потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури країни [154].

Наприклад, лише прямі економічні збитки від аварії на греблі Тетон (США, 1976 р.) склали майже 400 млн. доларів США при вартості будівництва гідровузла біля 40 млн. доларів. Загальні збитки від аварії, в результаті якої загинуло 11 осіб, сягнули 1 млрд. доларів [1, 13].

В той же час гідровузли відносяться до найбільш поширених серед відповідальних інженерних об'єктів. За даними Міжнародної комісії з великих гребель (ICOLD) в світі вже побудовано більше ніж 45 тисяч лише так званих «великих» гребель у складі гідровузлів різного призначення, до яких віднесені греблі висотою 15 метрів й вище, та греблі, що створюють водосховища об'ємом не менше 1 млн. м³. Загальна ж кількість всіх гребель, що були побудовані на Землі, перевищує 800 тисяч [36, 200].

Гідротехнічне будівництво у всі віки сприяло суспільно-економічному розвитку людства, індустріальним революціям тощо. На сучасному етапі гідровузли широко застосовуються в різних галузях народного господарства та сферах життєдіяльності людини, зокрема в гідроенергетиці, іригації, водному транспорті, виконують важливі соціально-економічні і соціально-екологічні функції (див. нижче табл. 1.2).

Практично всі розвинені країни світу в минулому столітті переживали бум будівництва гідровузлів на своїй території. Нині спостерігається нова хвиля масового будівництва великих гідровузлів в країнах, що стрімко розвиваються, зокрема в Бразилії, В'єтнамі, Китаї та ін. [36, 200]

Сфери застосування та корисні ефекти будівництва гідровузлів [154]

Соціально-економічні ефекти	Соціально-екологічні ефекти
<ul style="list-style-type: none"> • Гідроенергетика (ГЕС, ГАЕС) • Питне водопостачання • Промислове водопостачання • Водовідведення • Водоочищення • Водний транспорт • Іригація • Водосховища-охолоджувачі ТЕС, АЕС • Риборозведення • Транспортні переходи • Наливні ставкові господарства • Лісосплав 	<ul style="list-style-type: none"> • Рекреація • Водний спорт • Туризм • Екскурсії • Аматорське рибальство • Урбанізація територій • Боротьба з повенями • Рекультивация ландшафтів • Охорона природи • Охорона вод • Санітарні попуски • Меліорація

В Україні, за даними [184], налічується більше 1150 гідровузлів з гідроспорудами різної висоти, типу, призначення, аварії на яких можуть нести загрозу життю людей, навколишньому середовищу, матеріальним та економічним об'єктам, об'єктам критичної інфраструктури країни.

Враховуючи значний аварійний потенціал гідровузлів, їх особливе значення з погляду техногенної безпеки населення й територій та значне поширення, аналізу і оцінці безпеки та управлінню безпекою напірних гідроспоруд гідровузлів в усьому світі надають особливу увагу. Відповідні дослідження з безпеки гідровузлів ведуться і в Україні. В цілому більшість досліджень з безпеки гідровузлів як в світі, так і в Україні розвиваються в двох основних напрямках:

1) традиційному напрямку, як в межах детерміністичного (динамічного) підходу, з аналізом природних та техногенних чинників з метою виявлення строгих (функціональних) причинно-наслідкових зв'язків між станами гідрос-

пород та станами навколишнього середовища [35, 36, 50, 61, 139, 213, 215], в тому числі з врахуванням фізичного старіння матеріалів і ґрунтів, накопичення пошкоджень тощо [4, 183], розробкою математичних моделей гідроспоруд як складних динамічних систем «споруда-основа» при статичних та динамічних навантаженнях [78, 104, 173], в тому числі і з використанням методів індуктивного моделювання, математичної теорії катастроф тощо [43, 47, 68, 87, 138, 216], так і в рамках імовірнісного підходу – з використанням методів аналізу даних [53, 54, 208], математичної теорії надійності [5, 6, 64, 67, 72, 92, 103, 107, 182], стохастичної динаміки [23, 24, 87, 93], що орієнтуються на математичний апарат теорії ймовірностей, випадкових процесів тощо [29, 30, 73, 81, 109], логіко-імовірнісних методів аналізу надійності і безпеки структурно-складних систем [28, 134, 142, 148, 176, 195, 209, 217], методів рандомізації детерміністичних моделей та розрахункових схем споруд, їх конструкцій, основ [13, 27, 28, 41, 111, 116, 143, 152];

2) ризик-орієнтованому напрямку, як в межах детерміністичного підходу з використанням методів системного аналізу та теорії прийняття рішень [2, 3, 12, 39, 61, 69-71, 74, 75, 90, 97, 98, 100, 110, 180, 181, 194], так і імовірнісного підходу [26, 77, 147, 185, 187, 218-220, 225], з інтерпретацією аварійних подій як статистичних фактів з використанням статистичних ймовірностей [38, 211, 226], так і подій-припущень з використанням суб'єктивних ймовірностей [80, 110, 204, 225, 234, 235], з побудовою і дослідженням різного роду інформаційних моделей [8-10, 17-22, 51, 59, 60, 113-115, 164], в яких встановлюються як формальні, так і неформальні логіко-імовірнісні і нечіткі зв'язки між подіями-причинами і подіями-наслідками, з дослідженням повноти і якості інформації про стан гідроспоруд і довкілля, розкриттям невизначеності різної природи тощо [82, 146, 207].

Класичні рішення в області традиційних підходів до аналізу й оцінки безпеки та управління безпекою складних техногенних об'єктів і систем в рамках синтезу детерміністичного та імовірнісного підходів наведено в роботах В.В. Болотіна [23, 24]. Найбільш акцентовано ці підходи, в тому числі і щодо гідроспоруд, розвивалися також в роботах Л.Я. Аніщенко, О.І. Вайнберга, П.І. Бідю-

ка, В.Я. Данилова В.С. Дейнеки, С.О. Довгого, А.Г. Івахненка, Н.Д. Панкратової, А.В. Перельмутера, І.В. Сергієнка, О.М. Трофимчука, Г.І. Черного, Є.О. Яковлєва та ін., в роботах зарубіжних фахівців, серед яких В.А. Акімов, Г. Августі, А. Баратта, С.А. Еріксон, Дж. Касти, Х. Кумамото, В. Маршалл, Ц.Є. Мірцхулава, А.М. Половко, І.О. Рябінін, Е. Дж. Хенлі, С.Г. Шульман та ін.

Особливістю напрямку, який ми назвали традиційним, є орієнтація при розробці й використанні відповідних моделей і методів аналізу, оцінки надійності і безпеки гідровузлів, управління їх безпекою на забезпечення належного рівня якості, повноти і достовірності висхідної (апріорної) інформації.

Ризик-орієнтований напрям, з використанням різного роду інформаційних моделей, знайшов свій розвиток в роботах В.В. Бегуна, М.М. Биченка, І.П. Дрозд, М.З. Згуровського, С.П. Іванюти, А.Б. Качинського, Л.О. Коршевніюка, А.І. Костіна, Г.В. Лисиченка, Н.Д. Панкратової, І.В. Сергієнка, Д.В. Стефанишина, а також в працях Дж. Бехера, А. Бірка, С. Віка, Й.К. Врийлінга, Г. Кройцера, Л. Опирхала, В.Д. Радаєва, В. Роуї, П. Словіча, М. Уїланда, Д. Хартфорда, К. Хоєга, А.С. Шапкіна, Дж. Фусселя та ін. Фундаментальні рішення в цьому напрямку були отримані О.Г. Наконечним та його учнями.

Ризик-орієнтовані підходи не виключають використання фундаментальних рішень в області техногенної безпеки і строгих математичних моделей гідроспоруд. Їх основною особливістю є адаптація методів та моделей до наявної інформації про стан гідроспоруд і навколишнє середовище і використання ризику в якості інструменту для подолання невизначеності [14, 146, 154]. При цьому невизначеність інформації щодо поведінки гідроспоруд і стан навколишнього середовища не є перепорою для моделювання безпеки і прийнятті рішень щодо безпеки гідровузла, а власне ризик в його кількісному виразі може використовуватися в якості кількісної міри надійності і безпеки гідровузла.

Традиційні підходи до аналізу й оцінки безпеки та управління безпекою складних техногенних об'єктів дозволяють отримувати фундаментальні рішення, однак через брак інформації та неналежний рівень її достовірності їх досить складно реалізувати на практиці. В ризик-орієнтованих підходах до аналізу й оцінки безпеки та управління безпекою гідровузлів як складних техногенних

систем враховується як часткова детермінованість явищ та процесів, що відбуваються на спорудах та в навколишньому середовищі та визначають стан споруд, так і фактори ризику, пов'язані з невизначеністю причин і наслідків аварій.

Аварії на гідровузлах завжди відбувались з цілком конкретних причин, і, в багатьох випадках, як показував аналіз причин їх виникнення, були неминучими. Однак навіть тоді, коли аварія була невідворотною, не всі чинники аварії на момент її виникнення були відомими. Знання реальних причин аварії на одній гідроспоруді не завжди унеможливило аварію з тих же причин на іншій споруді. Перевірочні розрахунки аварійних гідроспоруд за допомогою контрольних, більш «точних» методів, з використанням «кращих» моделей та розрахункових схем тощо, часто показували, що попередні розрахунки цих споруд здійснювалися за методами, що були не гіршими, ніж контрольні [147]. В більшості випадків причина аварії на гідровузлі полягала не стільки у неправильному виборі моделей аварійних об'єктів, розрахункових методів чи розрахункових схем, скільки в неточності вхідних даних щодо показників властивостей матеріалів, ґрунтів, параметрів навантажень, параметрів споруд тощо. Все це обумовлює необхідність оцінок ризику, пов'язаного з можливими помилковими рішеннями.

Серед численних гідровузлів, що експлуатуються в Україні, виділяються гідровузли Дніпровського та Дністровського каскадів ГЕС і ГАЕС [36, 76, 95, 108]. Серед них: Київський гідроенергетичний комплекс у складі Київського гідровузла з одним з найдовших в світі напірним фронтом, наливні земляні гідроспоруди якого при форсованому підпірному рівні (ФПР) сягають 70 км, і гідроспоруд Київської ГАЕС; Дністровський гідроенергетичний комплекс у складі Дністровських ГЕС-1 і ГЕС-2 та Дністровської ГАЕС; неповторні за компоновочними рішеннями Дніпровський гідровузол, з найвищою в Україні бетонною греблею, і Дністровський гідровузол, з найвищою в Україні греблею з ґрунтових матеріалів, що спрягається з будівлею ГЕС, суміщеною з поверхневим водозливом; одна з найбільших ГАЕС в світі – Дністровська ГАЕС.

Серед основних особливостей складу гідровузлів Дніпровського, Дністровського каскадів, що суттєво ускладнюють оцінку їх надійності і безпеки виділяються такі [95, 154]:

- напірний фронт гідровузлів формується гідроспорадами різного типу, конструкції, призначення;
- серед напірних гідроспоруд по протяжності напірного фронту переважають гідроспоради з ґрунтових матеріалів, більшість з яких – земляні;
- суміщення різних функцій на бетонних гідроспорадах, зокрема, функцій напірних, енергетичних, водоскидних споруд;
- тривалі строки експлуатації більшості гідроспоруд Дніпровського каскаду, або їх будівництва – гідроспоруд Дністровського каскаду.

Унікальність вітчизняних гідровузлів визначається не лише параметрами, різноманіттям умов будівництва та експлуатації, індивідуальними особливостями системної організації, різноманітністю чинників, що визначають надійність й безпеку об'єктів, тривалими строками будівництва і експлуатації, високою ціною можливих аварій. Безпека експлуатації вітчизняних гідровузлів в значній мірі залежать від урахування фактору невизначеності індивідуальних чинників, що визначають наслідки можливих несправностей та відмов окремих гідроспоруд та обладнання. Складність системної організації, невизначеність різноманітних чинників аварійності – все це ускладнює оцінку надійності та безпеки вітчизняних гідровузлів традиційними способами і вимагає залучення кількісних оцінок ризику в якості міри невизначеності при прийнятті рішень щодо їх надійності і безпеки. Тому проблему кількісної оцінки ризиків аварій на гідротехнічних спорудах гідровузлів України слід визнати актуальною.

1.2. Задачі дослідження ризиків техногенних аварій

Під ризиком техногенної аварії надалі будемо розуміти деяку наукову абстракцію або формальну модель, яка використовується з метою вирішення задачі прийняття рішення в умовах, коли причини і наслідки аварійної події або рішення невизначені і можуть бути описані лише імовірнісними категоріями, за умов, коли неможливе однозначне рішення щодо безпеки потенційно небезпеч-

ного техногенного об'єкта і коли кінцевий вибір має здійснюватися між ймовірними здобутками і ймовірними збитками, представлена встановленою певним чином комбінацією ймовірності відповідної аварійної події та її наслідків.

У загальному випадку при дослідженнях ризику техногенної аварії вирішується комплекс взаємопов'язаних задач [2, 3, 8, 9, 14, 26, 28, 31, 32, 55, 56, 59, 69, 73-75, 77, 87, 90, 97, 100, 105, 107, 110, 115, 136, 140, 142, 146, 149, 150, 154, 155, 162, 166, 175-177, 180, 185, 187, 198, 199, 202, 204, 209, 216, 218-220, 224, 225, 234], основні з яких наступні (рис. 1.1).

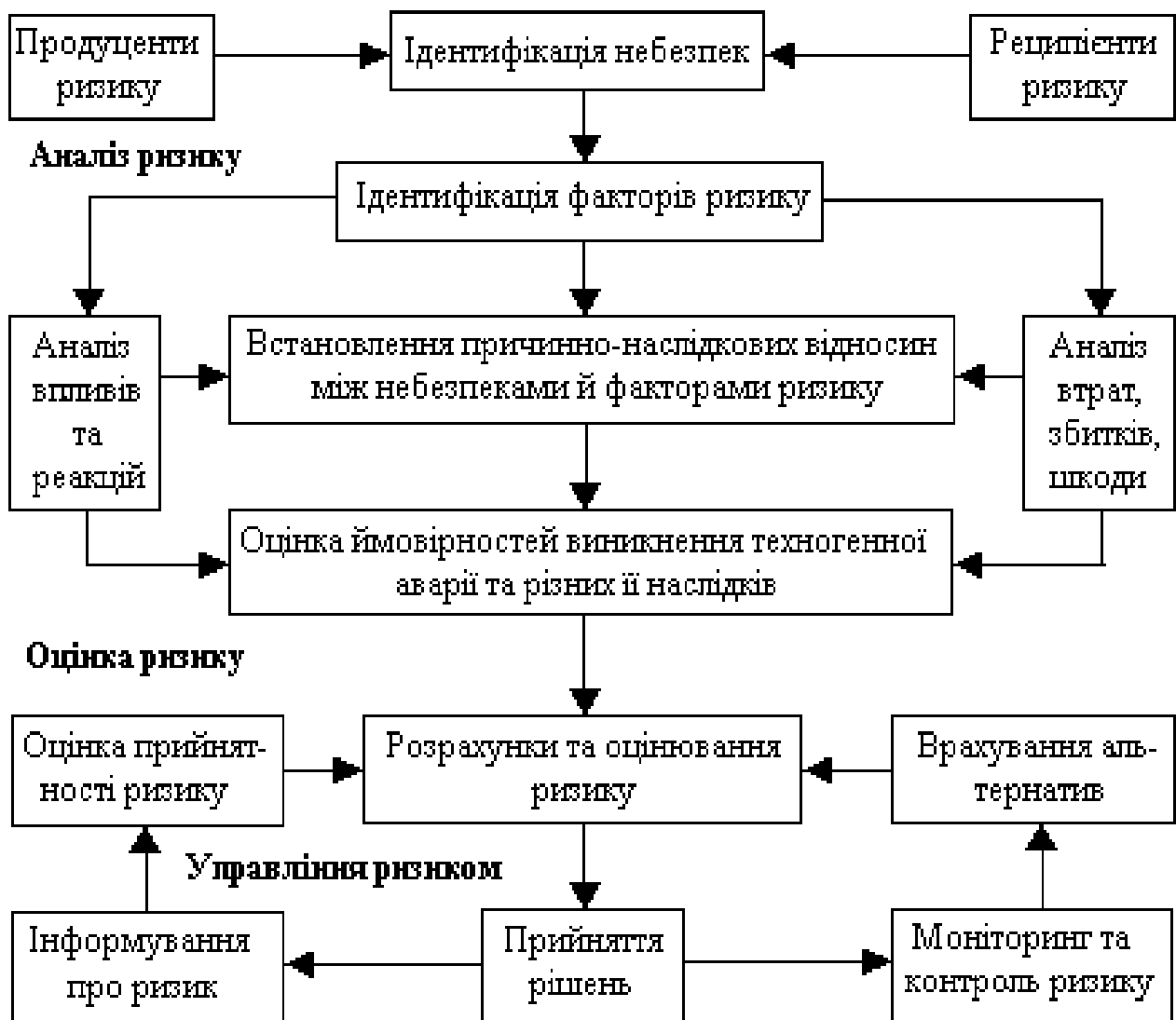


Рис. 1.1. Блок-схема основних задач дослідження ризику техногенної аварії [154, 162]

1). **Аналіз ризику**, в основі якого лежить встановлення продуцентів і реципієнтів ризику, ідентифікації небезпек та факторів ризику можливої аварії.

Вирішення задач з аналізу ризику техногенної аварії зводиться до цілеспрямованого виявлення обставин, які можуть контролюватися, й обставин, контролювати які в повній мірі за даних умов неможливо (продуцентів ризику), та реципієнтів ризику – індивідуумів, соціумів, народногосподарських об'єктів, видів діяльності, територій, акваторій тощо, що можуть зазнавати небезпечних впливів при можливій аварії [154, 162]. Зазвичай, різного роду наслідки негативного плану для реципієнтів ризику трактуються як фактори ризику [28]. В процесі аналізу ризику встановлюються причинно-наслідкові відносини між небезпеками та факторами ризику, накопичуються дані про потенційні втрати, збитки і шкоду та дані, необхідні для кількісної оцінки ймовірностей їх виникнення – з метою наступної кількісної оцінки ризику. На етапі аналізу ризику аварії зазвичай здійснюється моделювання аварії, різних причин і наслідків її виникнення і розвитку, обґрунтовується необхідність кількісної оцінки ризику.

2). **Оцінювання ризику**, з кількісними розрахунками (оцінкою кількісних значень ризику) на основі оцінки ймовірності виникнення техногенної аварії, ймовірностей різних її наслідків з оцінкою втрат, збитків, шкоди, кількості жертв тощо, визначення додаткового ризику (понад фонові – природні тощо його значення), залишкового, добровільного і недобровільного (вимушеного) ризику, встановлення допустимих (прийнятних) значень ризику (допустимого ризику) на основі встановлення границь його терпимості та прийнятності [220].

3). **Управління ризиком** – прийняття рішень щодо безпеки об'єкта з врахуванням ризику, інформування про ризик аварії, оптимізація систем контролю й моніторингу ризику. Цей етап може об'єднуватися з оцінюванням і аналізом ризику в єдиний процес, метою якого є мінімізація залишкового ризику після прийняття відповідних заходів [55, 56, 74, 75, 175, 178, 218-220, 227, 237].

Трактування ризику техногенної аварії, і, відповідно, його структура, розрахункові схеми й моделі ризику в значній мірі залежать від того, яка мета переслідується в процесі його досліджень та оцінювання [142, 146, 154, 155].

В деяких випадках ризик техногенної аварії може виражатися лише через її ймовірність. Представлення ризику аварії через ймовірність її реалізації може

цілком виправдовуватися у випадках, коли порівнюються аварійні події з еквівалентними наслідками. У випадках коли наслідки від різних аварій розрізняються, представлення ризиків лише через ймовірності відповідних аварійних подій не дозволяє в повній мірі вирішувати задачі управління ризиком.

Задача дослідження ризику техногенної аварії на гідровузлі може розглядатися як процес, що повторюється, коли надходить нова інформація або виникає нова проблема [162, 164]. При такій її постановці аналіз і оцінка ризику аварії на гідровузлі сприяють виявленню проблемних питань, вирішення яких потребує уточнення даних, проведення додаткових досліджень і вишукувань з метою отримання більш повної інформації. З новою інформацією оцінки ризику зазвичай змінюються, встановлюються нові фактори і параметри, «внесок» яких в загальний (сукупний, повний, сумарний, інтегральний) ризик аварії стає визначальним. Знання окремих складових повного ризику аварії допомагає сформулювати альтернативи, які здатні ефективно знижувати ідентифіковані часткові ризики, оскільки наявні ресурси для забезпечення безпеки гідровузла, як правило, обмежені. Можуть обмежуватися функціональні можливості гідроспоруд гідровузла, матеріально-технічні ресурси, обсяги фінансування, час виконання ремонтно-профілактичних та інших робіт тощо. У кожному із цих випадків вибір на користь того або іншого рішення може бути зроблений з урахуванням пріоритету різних складових загального ризику. Це стосується як випадків, коли внаслідок прийнятих рішень змінюються ймовірності аварії, так і випадків, коли змінюються можливі її наслідки. В процесі таких «ітераційних» досліджень ризику можуть обґрунтовуватися заходи, які сприятимуть зменшенню ризику аварії на гідроспорудах [157]. Ефективність рішень оцінюється шляхом співставлення ризиків, які прогнозуються до і після запровадження відповідних заходів. В такому вигляді оцінка ризику аварії на гідровузлі може розглядатися як інтегральна складова процесу аналітично-інформаційної підтримки рішень, направлених на забезпечення його надійності і безпеки.

1.3. Існуючі підходи до оцінки ймовірностей техногенних аварій, методи і моделі

За версією Міжнародної комісії з великих гребель (ICOLD) під ризиком аварії на гідроспоруді слід розуміти «міру ймовірності й ваги негативних ефектів для життя, здоров'я, власності або стану навколишнього середовища» [219, 220]. Комітет з безпеки гребель ICOLD рекомендує оцінювати ризик у вигляді математичного сподівання наслідків реалізації небажаної події, наприклад, як добуток імовірності реалізації негативної події на математичне сподівання величини наслідків цієї події, або у вигляді певної комбінації ймовірностей реалізації подій і пов'язаних з ними наслідків, поданої, наприклад, в графічній формі у вигляді кривих ризику або полів розсіювання ризику [28, 84, 90, 176, 218]. При такому трактуванні ризик аварії на гідровузлі залежить від імовірності виникнення аварійної події, а також від її наслідків, і може виражатися істотною величиною, навіть якщо ймовірність негативної події є досить малою [187, 234].

Оскільки ризик аварії залежить від ймовірності її реалізації, то однією з основних задач, які вирішуються при кількісній оцінці ризиків аварій, є оцінка ймовірностей їх виникнення [28, 164, 201, 234].

На разі розробляються і пропонуються різні підходи до імовірнісного прогнозування аварій на технічних об'єктах в рамках оцінки їх надійності та безпеки. В різній мірі ці підходи можуть бути використані і при оцінці ймовірностей аварій на гідровузлах. Найбільш актуальними серед них є такі:

- використання статистичних оцінок аварійності на гідроспорудах [28, 38, 66, 77, 84, 90, 159, 163, 168, 176, 190, 192, 204, 210, 211, 226];

- адаптація до нових задач методів та моделей математичної теорії надійності з використанням як параметричних, так системних моделей надійності технічних об'єктів та систем [23, 24, 28, 41, 78, 87, 93, 143, 147, 151, 173];

- рандомізація традиційних детерміністичних моделей та розрахункових схем гідроспоруд, їх конструкцій та основ [13, 27, 28, 41, 78, 152];

- логіко-імовірнісне моделювання (методи дерев подій, дерев рішень, дерев помилок, дерев відмов і несправностей тощо) [28, 147, 148, 150, 204, 234];
- реалізація сценарного підходу до прогнозування аварій на основі синтезу різних підходів, методів та моделей [149, 150, 164, 169].

1.3.1. Статистичні оцінки ймовірностей аварій на гідровузлах

Статистичні методи були першими, що використовувалися при оцінці ризиків техногенних аварій, і, натепер, залишаються серед найбільш популярних.

Інтерес до систематизації статистичних даних про аварії на гідропорудах з'явився ще в кінці 18-го століття. В 1786 р. в Німеччині вийшла книга І. Зільбершлага «Аварії на греблях», в якій, очевидно, була зроблена перша спроба систематизації та статистичного аналізу аварій на гідровузлах [13].

Починаючи з кінця 60-х років минулого століття, істотну роботу в області аналізу аварій на гідровузлах на основі статистичних даних почала проводити ICOLD. В її рамках був створений спеціалізований Технічний Комітет з аварій. Одночасно зі збором даних про аварії в рамках Технічного Комітету ICOLD почав створюватися міжнародний реєстр гідропоруд. Це суттєво розширило можливості для формування репрезентативних статистичних вибірок даних з багатьох проблем аварійності гідропоруд різного типу та призначення [28].

В 1995 р. Технічним комітетом з аварій ICOLD був випущений спеціалізований Бюлетень 99 «Dam failures – statistical analysis» [192], присвячений статистичному аналізу даних про аварії на гідровузлах. При підготовці Бюлетеня 99 були використані дані ICOLD щодо 17405 зареєстрованих гідровузлів. Були встановлені певні залежності відносних частот аварій на гідропорудах від типу споруд (виду матеріалів, конструкції тощо), висоти, об'єму водосховища, тривалості експлуатації до аварії, року введення в експлуатацію, виду аварії, можливої її причини, наслідків аварії.

У більшості випадків статистичні оцінки відносних частот аварій на гідровузлах узагальнювалися за кількома факторами, щоб забезпечити достатню

кількість даних для формування репрезентативних статистичних вибірок. При цьому у вибірки часто включалися і статистично неоднорідні дані. Тому статистичні оцінки аварій на гідровузлах можуть сприйматися неоднозначно [226].

Важливе значення для забезпечення статистичної однорідності даних про аварії на гідроспорудах гідровузлів можуть мати унікальні в кожному індивідуальному випадку конструктивні особливості гідроспоруд, особливості прийняття проектних рішень, відповідальність та призначення споруд, особливості основ та природних умов (інженерно-геологічних, кліматичних тощо), гідрологічна вивченість річок, особливості національних нормативних документів, різні технології будівництва, кваліфікація інженерів, рівень контролю та моніторингу на спорудах, різний рівень технічного обслуговування споруд при експлуатації, загалом різна національна «культура» забезпечення безпеки гідровузлів в цілому тощо. Крім того дані аналізу про причини аварій на гідроспорудах можуть виявитися неповними або помилковими [159, 163, 168, 192, 226].

Всі ці фактори можуть суттєво спотворювати статистичні оцінки ймовірностей аварій на гідровузлах.

Отримані на основі статистичного аналізу статистичні ймовірності аварій на гідровузлах не можуть безпосередньо використовуватися при прогнозуванні ймовірностей аварій на гідроспорудах, що експлуатуються, оскільки не дозволяють в повній мірі врахувати всі їх індивідуальні особливості та умови їхньої роботи. Проте як вибіркові оцінки (а portfolio, для сукупності гідроспоруд), як деякі осереднені оцінки аварійності, наприклад, по галузі в цілому, для вибірки гідроспоруд певного типу, що експлуатуються в країні, світі тощо, вони, безперечно, можуть заслуговувати на увагу [159, 163, 168, 190, 192, 199, 201, 211].

Не слід перебільшувати, але не варто і применшувати значення статистичного аналізу аварій на гідротехнічних спорудах. Цілеспрямоване накопичення даних про аварії, їх систематизація та встановлення статистичних закономірностей в залежності від типу споруд, інших визначальних факторів, з ідентифікацією основних форм аварій та причин їх виникнення, ранжируванням причин та форм аварій в залежності від частоти реалізації на гідроспорудах різних типів

тощо, встановленням пріоритетів, в певній мірі сприяють кращому розумінню складних проблем, що пов'язуються з аварійністю на гідровузлах [192, 226].

Останні, найбільш повні дані щодо статистичних оцінок ймовірностей аварій на гідротехнічних спорудах різного типу наведено в [159, 163, 168].

1.3.2. Методи та моделі математичної теорії надійності

Історично математична теорія надійності технічних об'єктів і систем розвивалась в двох основних, відносно самостійних, напрямках: як системна і параметрична теорії надійності.

Системна теорія надійності орієнтується на моделювання технічних об'єктів у вигляді систем і використання статистичної інтерпретації ймовірності елементарної відмови в системі як випадкової події. Тому системну теорію надійності називають також статистичною [6]. Математичні моделі елементарних аварійних подій в системах, покладені в основу цього наукового напрямку в загальній теорії надійності, ґрунтуються на результатах статистичної обробки даних ресурсних випробувань відповідних структурних одиниць системи на безвідмовність. В першу чергу системна теорія використовується у випадку масових об'єктів, що експлуатуються в статистично однорідних умовах (статистично однорідних об'єктів), та об'єктів, в тому числі і унікальних, які мають добре розвинену мережеву структуру і складаються зі статистично однорідних елементів – об'єктів масового виробництва. Це різного роду гідравлічні, електротехнічні, електронні, механічні системи, системи автоматики тощо. Ресурсні випробування окремих складових частин таких об'єктів є відносно простими, а умови їхньої експлуатації можуть моделюватися на стендах або в натурі.

До таких об'єктів у складі гідровузлів можуть відноситися: устаткування й обладнання, що встановлюється на гідроспорудах – механічне, гідроенергетичне, електротехнічне, засоби автоматизованого контролю і управління тощо [5, 6, 16, 28, 34, 37, 64, 67, 72, 91, 148, 150, 210, 211], а також різного роду пристрої в тілі і основах гідроспоруд – дренажні, протифільтраційні тощо [13, 28].

Параметрична теорія надійності, на відміну від системної теорії, розвивається щодо індивідуальних, унікальних об'єктів [23, 24], що функціонують за різних умов, об'єктів, що, зазвичай, не мають розвиненої системної структури, зокрема мережевої, і складаються зі статистично неоднорідних, в тому числі і унікальних структурних одиниць. При цьому аналізується залежність між ймовірністю відмови або аварії об'єкта й параметрами, що визначають його поведінку і здатність виконувати функції за вимогою.

Імовірнісне прогнозування відмов та аварій на об'єктах в рамках параметричної теорії здійснюється на рівні подій-припущень, які вибудовуються як порушення деяких визначених нормами критеріїв надійності (безпеки), що встановлюються в залежності від типу об'єкта, його конструкції, призначення, умов експлуатації тощо, з використанням поняття індивідуальної (умовної, суб'єктивної, байєсівської) ймовірності, як міри впевненості в істинності суження щодо порушення відповідного критерію за заданих умов [23, 24]. При цьому оцінка ймовірностей реалізації умов роботи об'єкта може ґрунтуватися на імовірнісній мірі, логічних побудовах й статистичній інформації, яка надходить з даними щодо параметрів навантажень, показників властивостей матеріалів та ґрунтів, що складають тіло споруд, їх основи тощо, і які, при наявності відповідних статистичних вибірок даних, можуть розглядатися як масові явища.

Таким чином в параметричній теорії надійності поєднуються два підходи до трактування ймовірності можливої аварійної події: статистичний – щодо реалізації небажаних значень параметрів навантажень, показників властивостей матеріалів та ґрунтів тощо, які розглядаються як випадкові величини, що формують статистичні вибірки даних, та суб'єктивний (байєсівський) підхід – щодо ймовірностей відмов та аварій об'єкта, як подій-припущень [23, 24, 28, 151].

Моделі системної теорії надійності. Основним (базовим) рівнянням системної теорії надійності є диференціальне рівняння для визначення інтенсивності відмов (аварій) об'єктів, що не відновлюються [6, 23, 24, 28, 92, 107]:

$$\lambda(t) = -\frac{V'(t)}{V(t)}, \quad (1.1)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність виникнення відмов (аварій); $V'(t)$ – похідна функції ймовірності безвідмовної роботи $V(t)$.

Однією з найпростіших математичних моделей системної надійності, справедливих для статистично однорідних об'єктів, що не відновлюються, є експоненціальний закон надійності. Згідно з цим законом потік відмов об'єкта розглядається як стаціонарний пуасонівський потік з параметром (інтенсивністю) потоку випадкових подій $\lambda = \text{const}$. За умови, що на початку експлуатації об'єкт знаходився в працездатному стані, ймовірність виникнення аварії (відмови) об'єкта в момент часу t за цим законом буде:

$$P(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t). \quad (1.2)$$

Для відновлюваних об'єктів для моделювання ймовірності відновлення теж можна використати експоненціальний закон, у вигляді:

$$R(t) = 1 - \exp(-\mu \cdot t_r), \quad (1.3)$$

де $R(t)$ – ймовірність відновлення працездатного стану об'єкта; μ – інтенсивність відновлення його працездатності; t_r – додатковий час, що відпускається на відновлення працездатності об'єкта.

При стаціонарному пуасонівському потоці відмов і експоненціальному законі розподілу часу відновлення працездатності ймовірність відмови відновлюваного об'єкта на момент часу $t + t_r$ буде [28]:

$$P(t + t_r) = 1 - \exp\{-\lambda \cdot t \exp(-\mu \cdot t_r)\}. \quad (1.4)$$

В системній теорії надійності також приймається, що окремі складові частини об'єкта, який розглядається як система, взаємодіють між собою за певними логічними схемами, базовими (фундаментальними) серед яких є схеми послідовного й паралельного за надійністю з'єднань системних одиниць [28, 34, 107]. При цьому показники надійності окремих складових частин об'єкта (як елементів системи) у вигляді ймовірностей відмов (інтенсивностей відмов, ймовірностей безвідмовної роботи тощо) вважаються попередньо заданими.

Логічну взаємодію елементів за надійністю в системі у випадку, коли відмова (аварія системи може відбуватися при відмові будь-якого з її елементів, називають схемою послідовного з'єднання (рис. 1.2). Таку систему називають також системою без резервування, або системою без надмірності.

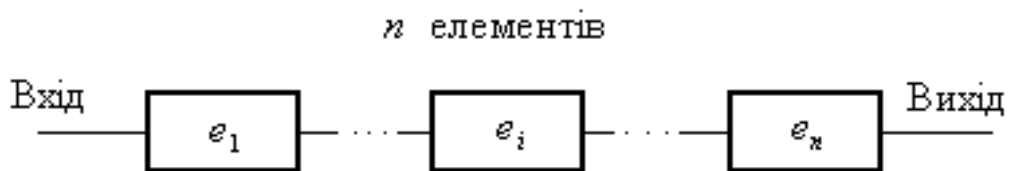


Рис. 1.2. Логічна схема послідовного за надійністю з'єднання елементів в системі без надмірності

Ймовірність аварії системи, що складається з n структурних одиниць, з послідовним за надійністю з'єднанням (позначимо її символом S^{ir}), в загальному випадку може змінюватися в межах [34]:

$$P(e_i)_{\max} \leq P(S^{ir}) \leq \left(1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(e_i)] \right), \quad (1.5)$$

де $P(e_i)_{\max}$ — максимальна з ймовірностей $P(e_i)$ відмов i -х елементів системи S^{ir} (ймовірність відмови «найслабшої» її ланки); \prod — символ добутку.

Нижня межа (inf) ймовірності аварії системи без резервування $P(S^{ir})^{\text{inf}} = P(e_i)_{\text{max}}$ встановлюється у випадку структурних одиниць, відмови яких є функціонально, логічно або структурно залежними сумісними подіями.

Верхня межа (sup) ймовірності аварії системи без резервування $P(S^{ir})^{\text{sup}} = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(e_i)]$ встановлюється у випадку структурних одиниць, відмови яких є стохастично незалежними сумісними подіями.

Логічну взаємодію елементів за надійністю у системі з надмірністю називають схемою паралельного з'єднання (рис. 1.3). Таку систему називають також зарезервованою системою або системою з паралельним з'єднанням структурних одиниць за надійністю.

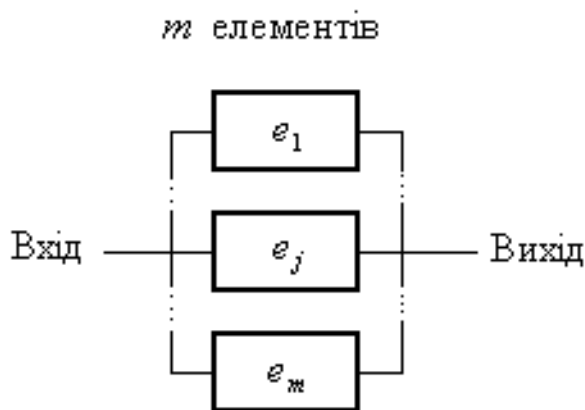


Рис. 1.3. Логічна схема паралельного з'єднання за надійністю елементів в системі з надмірністю

Ймовірність аварії системи з надмірністю, що складається з m структурних одиниць, з паралельним за надійністю з'єднанням (позначимо її символом S^r), в загальному випадку може змінюватися в межах [34]:

$$\prod_{j=1}^m P(e_j) \leq P(S^r) \leq P(e_j)_{\text{min}}, \quad (1.6)$$

де $P(e_j)_{\text{min}}$ – мінімальна з ймовірностей $P(e_j)$ відмови j -х елементів зарезервованої системи S^r (ймовірність відмови найбільш надійного її елемента); \prod – символ добутку.

Нижня межа (inf) ймовірності аварії системи з резервуванням

$P(S^r)^{\text{inf}} = \prod_{j=1}^m P(e_j)$ встановлюється у випадку структурних одиниць, відмови

яких є стохастично незалежними сумісними подіями.

Верхня межа (sup) ймовірності аварії системи з резервуванням

$P(S^r)^{\text{sup}} = P(e_j)_{\text{min}}$ встановлюється у випадку структурних одиниць, відмови

яких є функціонально, логічно або структурно залежними сумісними подіями.

В загальному випадку ймовірність аварії складної системи, що складається з багатьох елементів, в тому числі і неоднорідних, може визначатися не лише логікою взаємодії за надійністю її структурних одиниць (елементів), а й наявністю функціональних та стохастичних зв'язків між відмовами окремих її елементів. При цьому, при неможливості чіткої структуризації об'єкта як системи і всіх зв'язків між структурними одиницями об'єкта як елементами системи на рівні елементарних відмов, оцінка ймовірності системної аварії може змінюватися в значному діапазоні значень [23, 24, 28].

Приклади використання методів та моделей системної теорії надійності при оцінці ймовірностей відмов та аварій на гідропорудах, устаткуванні та обладнанні, що на них встановлюється, наведено в [13, 28, 41, 143, 147, 158].

Моделі параметричної теорії надійності. У загальній постановці задача параметричної надійності технічного об'єкта зводиться до так званої задачі стохастичної динаміки [23, 24], предметом якої є вивчення поведінки параметрів об'єкта в часі в деякому «вичерпному просторі його якості Θ » при випадкових зовнішніх впливах і випадковій зміні властивостей об'єкта.

Фундаментальним рівнянням стохастичної динаміки є рівняння Райса, яке описує закон зміни середнього числа «викидів» за допустимий рівень ω_x (встановлений в області допустимих станів $\Omega(\omega_x)$ у просторі якості Θ об'єкта) за одиницю часу для стаціонарного випадкового процесу $\tilde{x}(t)$, яким описується поведінка випадкового параметра \tilde{x} поточного стану об'єкта [87]:

$$\bar{n}_{\omega_x} = \bar{n}_{0,x} \exp\left(-\frac{(\omega_x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (1.7)$$

де $\bar{n}_{0,x}$ – середня інтенсивність числа викидів для стаціонарного процесу $\tilde{x}(t)$ (середнє число викидів за одиницю часу) за нульовий рівень (при $\omega_x = m_x$); m_x – математичне сподівання (середнє значення) параметра \tilde{x} ; σ_x – середньоквадратичне відхилення (стандарт) параметра \tilde{x} .

Умовна імовірність аварії або параметричної відмови об'єкта $P(t|x)$ як імовірність одиничного викиду випадкового процесу $\tilde{x}(t)$ за допустимий рівень ω_x на заданому часовому відрізку $[t_0, t]$ при цьому буде [23]:

$$P(t|x) = 1 - \Pr\{\tilde{x}(t) \in \Omega(\omega_x); t \in [t_0, t]\}, \quad (1.8)$$

де $\Pr\{*\}$ – ймовірність реалізації події $\tilde{x}(t) \in \Omega(\omega_x); t \in [t_0, t]$.

Ймовірність $\Pr\{*\}$ В.В. Болотін назвав умовною функцією надійності (безвідмовної роботи) об'єкта за параметром x .

Використавши формулу повної ймовірності, знайдемо повну (безумовну) ймовірність аварії об'єкта на інтервалі часу $[t_0, t]$:

$$P(t) = \int_{\omega_1} \dots \int_{\omega_N} P(t|x_i) p(x_i) \dots dx_i \dots dx_N, \quad \Omega_N = \{\omega_i\}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1.9)$$

де $P(t|x_i)$ – умовна імовірність аварії або параметричної відмови об'єкта, визначена за параметром \tilde{x}_i ; $p(x_i)$ – щільність функції розподілу ймовірності випадкового параметра \tilde{x}_i .

Розрахункова схема, спосіб параметричного описання поведінки об'єкта та характер обмежень при визначенні допустимої області його станів (критеріїв надійності і безпеки) в значній мірі визначають математичну структуру моделей параметричної надійності. Поряд з параметричними моделями, елементами котрих слугують випадкові процеси, можуть розглядатися й континуальні моделі, елементами яких є випадкові поля [23]. Однак найбільше поширення в параме-

тричній теорії в практичних розрахунках ймовірностей аварій і відмов технічних об'єктів набули моделі, в основу яких покладено моделювання визначальних параметрів як випадкових величин з заданими законами розподілу [116].

Наприклад, для найпростішої параметричної моделі надійності (безпеки) об'єкта типу «параметр u – поле допуску $[u]$ », де параметр u моделюється як випадкова величина, ймовірність аварії як ймовірність непопадання випадкового значення U параметра u в поле допуску $[u] = [u_{\min}, u_{\max}]$ буде [146, 151]:

$$P(U \notin [u_{\min}, u_{\max}]) = \int_{-\infty}^{u_{\min}} p(u) du + \int_{u_{\max}}^{+\infty} p(u) du, \quad (1.10)$$

або

$$P(U \notin [u_{\min}, u_{\max}]) = 1 + F(u_{\min}) - F(u_{\max}), \quad (1.11)$$

де u_{\min} , u_{\max} – мінімальне й максимальне допустимі значення параметра u ; $p(u)$ – щільність розподілу ймовірності параметра u ; $F(u_{\min})$, $F(u_{\max})$ – інтегральні функції розподілу параметра u при u_{\min} та u_{\max} , відповідно.

1.3.3. Рандомізація детерміністичних моделей та розрахункових схем

В основі багатьох практичних розрахункових методів та ймовірнісних моделей надійності інженерних споруд, в тому числі і гідроспоруд, їх конструкцій і основ, лежить ідея об'єднання традиційних (детерміністичних) методів та схем їх розрахунку (статичних, динамічних, міцності, стійкості тощо) з методами теорії ймовірності [4, 13, 23, 24, 27, 28, 78, 87, 93, 104, 111, 116, 143, 152].

В детерміністичних моделях та розрахункових схемах всі визначальні параметри розділяють на дві групи: на параметри, що відносяться до здатності споруди (її конструкції, основи, конструктивного елемента) R витримувати впливи і навантаження, і параметри, що описують ці силові впливи N . При цьому можуть встановлюватися відповідні залежності у вигляді функцій випад-

кових аргументів для R і N від відповідних параметрів (аргументів), які називають рівняннями зв'язку [4, 13, 23, 24, 27, 28, 93, 111, 116].

Нехай нам відомі функції розподілу R і N як випадкових величин. Таке представлення R і N називають їх рандомізацією у вигляді випадкових величин. Тоді з достатньою для практики точністю ймовірність аварії буде [23]:

$$P(R < N) = \int \int_{R < N} p(R)p(N)dRdN, \quad (1.12)$$

де $p(R)$, $p(N)$ – щільності розподілу R і N , відповідно. Інтегрування здійснюється в області значень $R < N$.

В [146] було показано, що у випадку стохастичної незалежності випадкових величин R і N ймовірність події $R < N$ можна визначити за формулою:

$$P(R < N) = \left[\int_{-\infty}^{R_c} p(R)dR + \int_{N_c}^{+\infty} p(N)dN \right]^2, \quad (1.13)$$

або

$$P(R < F) = [1 + F(R_c) - F(N_c)]^2, \quad (1.14)$$

де $F(R_c)$, $F(N_c)$ – інтегральні функції розподілу випадкових величин R і N в точці перетину їх функцій щільності розподілу, де $R_c = N_c$.

Числові характеристики функцій розподілу ймовірностей випадкових величин R і N можуть бути встановлені опосередковано за відомими числовими характеристиками функцій розподілу відповідних визначальних параметрів. Представлення відповідних функцій R і N як функцій випадкових аргументів називають рандомізацією у вигляді рівнянь зв'язку [23, 24, 27, 28].

Найбільш прості співвідношення між числовими характеристиками функцій розподілу R і N і числовими характеристиками відповідних аргументів

існують у випадках, коли ці функції є лінійними, а розподіли аргументів як випадкових величин підкоряються нормальному закону [23, 24, 28].

У випадку нелінійності рівнянь зв'язку останні можуть бути наближено замінені лінійними в заданому діапазоні можливих значень випадкових аргументів. Метод оцінки числових характеристик розподілів функцій випадкових параметрів, заснований на ідеї заміни нелінійних функцій у рівняннях зв'язку, які описують поведінку об'єкта, лінійними функціями, називають методом стохастичної лінеаризації [28, 78].

Стохастична лінеаризація деякої функції $\Psi = \psi(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i, \dots, \tilde{x}_n)$ випадкових аргументів є наближенням цієї функції лінійними членами ряду Тейлора в околі точки $(E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_i), \dots, E(x_n))$, де $E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_n)$ – математичні сподівання величин $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i, \dots, \tilde{x}_n$, відповідно.

Числові значення характеристик розподілу вихідної випадкової величини Ψ , яка моделюється рівнянням зв'язку $\Psi = \psi(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i, \dots, \tilde{x}_n)$, визначаються наступними залежностями [28]:

математичне сподівання

$$E(\Psi) \approx \Psi(E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_i), \dots, E(x_n)), \quad (1.15)$$

дисперсія

$$D(\Psi) \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} \right)_E^2 \sigma^2(x_i) + 2 \sum_{i < j} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} \right)_E \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \right)_E \rho(x_i, x_j) \sigma(x_i) \sigma(x_j), \quad (1.16)$$

де $\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} \right)_E$ – частинна похідна функції Ψ по x_i в точці $(E(x_1), E(x_2), \dots, x_i, \dots, E(x_n))$;

$\sigma(x_i), \sigma(x_j)$ – середні квадратичні відхилення (стандарти) величин x_i, x_j ;

$\rho(x_i, x_j)$ – коефіцієнт кореляції випадкових величин x_i, x_j .

Розгляд ще одного (квадратичного) члена ряду Тейлора дозволяє врахувати асиметричність розподілів $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i, \dots, \tilde{x}_n$ й отримати більш точні рішення для $E(\Psi)$, $\sigma(\Psi)$, та визначити третій (асиметрію) й четвертий (ексцес) моменти розподілу випадкової величини Ψ [27].

У випадках, коли аналітичне представлення рівняння зв'язку для Ψ неможливе, для особливо складних аналітичних функцій зв'язку, або при недостатній кількості даних, що можуть бути використані для встановлення числових характеристик розподілів $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i, \dots, \tilde{x}_n$ застосовують метод імітаційного статистичного моделювання (метод Монте-Карло, метод статистичних випробувань).

Завдяки можливостям сучасних комп'ютерів в рамках такого моделювання здійснюється велика кількість статистичних імітацій випадкових значень вихідної величини Ψ , яка описується відповідним рівнянням зв'язку, в залежності від значень вхідних параметрів $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i, \dots, \tilde{x}_n$ як випадкових параметрів [27].

Моделювання згідно з методом Монте-Карло може здійснюватися при рівняннях зв'язку будь-якого виду й будь-якої складності. Вирішення задачі зводиться до побудови імітаційної моделі і проведення незалежних статистичних імітацій згідно з визначеними умовами. Незалежність тут означає, що кожна наступна імітація проводиться при значеннях аргументів, заданих випадковим чином, без врахування їх попередніх значень. Тобто система перед початком чергового статистичного випробовування «повертається» до початкового стану.

За результатами статистичних випробовувань формується вибірка випадкових значень величини Ψ . Далі імовірнісне прогнозування аварії може здійснюватися двома основними способами [27, 28, 151].

Нехай критерій безпечної роботи об'єкта задається у вигляді $\Psi \leq [\Psi]$, де $[\Psi]$ – допустиме значення Ψ . Тоді ймовірність аварії буде:

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{\theta(\Psi - [\Psi])}{n}, \quad (1.17)$$

де $\theta(*)$ – функція Хевісайда, яка приймається рівною одиниці при $\Psi - [\Psi] \geq 0$ і рівною нулю, якщо $\Psi - [\Psi] < 0$; n – кількість статистичних випробувань.

При складних рівняннях зв'язку, поданих у вигляді систем диференціальних й інтегральних рівнянь тощо, використовують інший підхід: метод «кинджальної вибірки» (або метод «обмеженої вибірки»). Згідно з цим способом встановлюється закон розподілу вихідного параметра Ψ й оцінка ймовірності аварії на об'єкті здійснюється, наприклад, за формулами (1.10)÷(1.14). Кількість статистичних випробувань при цьому вибирається виходячи з допустимих похибок визначення числових характеристик розподілу ймовірності Ψ й умов прийняття тієї чи іншої гіпотези щодо аналітичного закону розподілу Ψ .

Приклади використання різних підходів до рандомізації детерміністичних моделей та розрахункових схем при оцінці ймовірностей відмов та аварій на гідропоруках наведено в [27, 28, 78, 82, 93, 147, 151, 152, 207].

Як показує аналіз останніх літературних джерел, присвячених оцінці ймовірностей аварійних подій в складних технічних системах, йде процес поступового злиття (синтезу) підходів та методів системної і параметричної теорій, перенесення ідей і наукових результатів з однієї області імовірнісного аналізу й оцінки аварійності технічних об'єктів і систем в іншу [28, 78, 151].

Оцінка ймовірностей системних аварій в рамках синтезу методів системної і параметричної теорій надійності зводиться до наступних кроків [28]:

- структуризації задачі параметричної надійності об'єкта на основі ідентифікації його системної структури та системних властивостей з визначенням критеріїв параметричної надійності, що відповідають цим властивостям;
- вирішення задач параметричної надійності щодо окремих структурних одиниць об'єкта як єдиної системи з оцінкою ймовірностей параметричних відмов як елементарних аварійних подій в системі;
- синтез результатів вирішення задач параметричної надійності окремих структурних одиниць об'єкта як системи з використання підходів і методів системної теорії надійності з оцінкою ймовірності системної відмови (аварії).

Такий підхід можна назвати системним, оскільки в ньому органічно поєднуються системний аналіз і синтез [28, 151]. Можливості такого підходу можуть бути значно розширені за рахунок використання при імовірнісному прогнозуванні аварійності на гідровузлах й інших підходів, в залежності від наявних даних щодо аварійності різних гідроспоруд та об'єктів у складі гідровузлів.

1.3.4. Логіко-імовірнісні методи

Більшість чинників аварійності на гідровузлах, як на об'єктах унікальних, слід розглядати на рівні подій-припущень [164, 228, 234]. При цьому на перший план при моделюванні причинно-наслідкових відносин між різними чинниками аварійності виходять інтуїтивний (евристичний) та логічні методи аналізу.

Необхідність застосування евристичного методу аналізу, особливо на початкових етапах моделювання аварій на гідровузлах, обумовлюється високим рівнем невизначеності даних, на основі яких формулююся події-припущення, та складнощами структуризації задачі імовірнісного прогнозування. В свою чергу логічні побудови дозволяють формалізувати задачі імовірнісного прогнозування аварій, отримувати кількісні оцінки ймовірностей системних аварій як ймовірностей подій-наслідків за відомими ймовірностями подій-причин [164].

Серед основних евристичних прийомів аналізу чинників аварійності в складних системах виділяють [176, 209]:

- 1). Заміна більш загальної аварійної події в системі менш загальною, але більш конкретною подією.
- 2). Поділ складної аварійної події на більш прості події.
- 3). Встановлення причин настання події-наслідку і використання їх в якості більш конкретних подій.
- 4). Заміна однієї події-причини двома, одна з яких може трактуватися як «невиконання захисних дій» тощо.
- 5). Виявлення спільної дії (перетину) кількох подій-причин, які спричинюють настання аварійної події-наслідку.

Логіку взаємодії аварійних подій в системах з метою оцінки ймовірностей подій-наслідків намагаються звести до простих двомісних логічних операцій. В різній мірі ці логічні операції представлено в двох найбільш поширених методах логіко-ймовірнісного прогнозування техногенних аварій – методі дерев подій та методі дерев відмов і несправностей [164, 169]. Основні з них наступні:

1) кон'юнкція (символ операції \wedge); нехай для реалізації аварійної події A повинні одночасно відбутися події-причини B_1, B_2 (маємо перетин $B_1 \cap B_2$, добуток $B_1 \times B_2$, B_1 «і» B_2 подій B_1, B_2); ймовірність реалізації події A буде:

$$P(A) = P(B_1 \wedge B_2) = P(B_1)P(B_2); \quad (1.18)$$

2) диз'юнкція (символ \vee); нехай для реалізації аварійної події A достатньо реалізації однієї події з двох сумісних подій B_1, B_2 (маємо об'єднання $B_1 \cup B_2$, суму $B_1 + B_2$, B_1 «або» B_2 подій B_1, B_2); ймовірність реалізації A буде:

$$P(A) = P(B_1 \vee B_2) = P(B_1) + P(B_2) - P(B_1)P(B_2); \quad (1.19)$$

3) імплікація (символ \rightarrow) – коли подія-умова C обумовлює настання аварійної події-наслідку A («якщо» C , «то» A); маємо ймовірність події A :

$$P(A) = P(C \rightarrow A) = P(A | C)P(C); \quad (1.20)$$

4) виключна диз'юнкція (символ \oplus) – для реалізації аварійної події-наслідку A достатньо реалізації однієї події з двох несумісних подій B_1, B_2 , («або» B_1 , «або» B_2); ймовірність реалізації події A буде:

$$P(A) = P(B_1 \oplus B_2) = P(B_1) + P(B_2). \quad (1.21)$$

У формулах (1.18÷1.21) $P(B_1), P(B_2), P(C)$ – ймовірності подій B_1, B_2, C ; $P(A | C)$ – умовна ймовірність події A при виникненні події-умови C .

Метод дерев подій. Як модель аварії дерево подій – це граф-дерево, де множиною елементів є визначена скінчена множина (ланцюжок) певних аварійних подій як можливих наслідків виникнення деякої висхідної події-причини, а множиною відповідностей – відносини між ними [164, 169, 176, 179, 180, 234].

Побудова дерева подій здійснюється на основі прямих логічних міркувань – від можливої події-причини до можливих подій-наслідків. Такі міркування в системному аналізі називають індуктивною логікою [43, 44, 138].

В найпростішому випадку при прогнозуванні аварії на гідроспоруді повна (безумовна) ймовірність настання аварійної події-наслідку S при деякій події-умові або причині C може визначатися за формулою повної ймовірності [164]:

$$P(S, C) = P(X_C \geq x_C) \cdot P(Y_{S,C} < y_{S,C}), \quad (1.22)$$

де $P(X_C \geq x_C)$ – ймовірність перевищення деякої кількісної характеристики аварійної події-умови C , тобто ймовірність того, що випадкова величина X_C , якою описується відповідна кількісна характеристика випадкової події C , перевищить встановлене допустиме значення x_C ; $P(Y_{S,C} \leq y_{S,C})$ – умовна ймовірність реалізації аварійної події-наслідку S в результаті події C , що встановлюється як інтегральна функція ймовірності деякого допустимого значення $y_{S,C}$ кількісної характеристики $Y_{S,C}$, яка описує подію-наслідок S за умови C .

У випадках коли прогнозується розвиток небезпечних подій у деякій послідовності S без розгалужень, то ймовірність $P(S, A)$ відповідної аварійної ситуації S , ініційованої деякою початковою подією-причиною A , з переходом до подій $B, C, D \dots$, згідно з методом дерев подій, буде [164, 169, 234]:

$$P(S, A) = P_S(A) \cdot P_S(B | A) \cdot P_S(C | B) \cdot P_S(D | C) \cdot \dots, \quad (1.23)$$

де $P_s(A)$ – ймовірність реалізації деякої початкової аварійної події A , що здатна ініціювати послідовність аварійних подій S ; $P_s(B|A)$, $P_s(C|B)$, $P_s(D|C)$... – умовні ймовірності переходу від події A до події B , від події B до події C , від події C до події D і т. д., з охопленням всього ланцюжка подій, що складають послідовність (аварійну ситуацію) S .

Початкова аварійна подія на гідровузлі може набувати різних масштабів (наприклад, землетруси – мати різну інтенсивність, паводки – різні максимальні витрати) тощо. У цьому випадку аварійна ситуація S формується як послідовність аварійних подій з розгалуженнями, де початкова подія A представляється повною групою подій A_i , $i = \overline{1, n}$, кожній з яких відповідає своя послідовність. Повна ймовірність аварійної ситуації S з розгалуженнями [164, 169, 234]:

$$P(S, A) = \sum_{i=1}^n P(S, A_i), \quad (1.24)$$

де $P(S, A_i)$ – ймовірність реалізації i -ї послідовності аварійних подій.

Умовою формування повної групи подій, як відомо, є їх несумісність. Для несумісних подій ймовірність об'єднання дорівнює сумі ймовірностей, тобто, ймовірність події A :

$$P_s(A) = \sum_{i=1}^n P_s(A_i), \quad (1.25)$$

де $P_s(A_i)$ – ймовірність реалізації події A_i , що здатна ініціювати ситуацію S .

В більш загальному випадку будується бінарне дерево подій, в якому відображаються як послідовності подій, що ведуть до аварії, так і послідовності подій, що сприяють виходу з аварійних ситуацій [164, 234]. Такі дерева подій називають деревами рішень. В цьому випадку імовірнісні розрахунки дерева подій здійснюються з врахуванням несумісності розгалужень, що ведуть до аварії та розгалужень, які ведуть до виходу з аварійної ситуації [176, 179].

Метод дерев відмов і несправностей. Розрахункова модель методу являє собою граф-дерево, в якому множиною елементів виступає скінчена множина можливих аварійних подій в системі як подій-причин, умов, подій-наслідків, що можуть призвести до аварії в системі, а множиною відповідностей – відносини (зв'язки) між ними. Цей метод може розглядатися як узагальнення відомого в науковій літературі під різними назвами логіко-імовірнісного методу аналізу і оцінки ймовірностей аварійних подій в системі (дерев помилок, дерев відмов, дерев несправностей), в основі якого лежить дедуктивна логіка [176, 195, 209].

Згідно з методом дерев відмов і несправностей ймовірності аварійних подій і станів в системі, що є наслідками («виходи»), встановлюються за відомими ймовірностями подій-причин («входів») в залежності від дії так званих логічних операторів, що моделюють логіку причинно-наслідкових зв'язків між «входами» та «виходами» (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Формули для розрахунку ймовірностей подій-наслідків за методом дерев відмов і несправностей [28, 164, 176, 195, 209]

Найменування оператора	Розрахункові формули для оцінки ймовірностей події-наслідку A в залежності від подій-причин B та C
«АБО»	$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(B_i)), \quad (1.26)$ <p>n – загальна кількість i-х незалежних «вхідних» подій B_i</p>
«ВИКЛЮЧНЕ АБО»	$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i), \quad (1.27)$ <p>n – загальна кількість i-х несумісних «вхідних» подій</p>
«І»	$P(A) = \prod_{i=1}^n P(B_i), \quad (1.28)$ <p>n – загальна кількість i-х незалежних «вхідних» подій</p>
«ЗАБОРОНА»	$P(A) = P(B) \cdot P(C), \quad (1.29)$
В формулах (1.26)÷(1.29) ймовірності: $P(B_i)$, $P(B)$ – подій на «вході» (події-причини B_i або B); $P(C)$ – події-умови C ; $P(A)$ – події-наслідку A	

Логічні оператори в методі дерев відмов і несправностей відтворюють відомі логічні операції: оператор «АБО» – логічну операцію «диз'юнкція»; «І» – «кон'юнкцію»; «ВИКЛЮЧНЕ АБО» – «виключна диз'юнкцію»; «ЗАБОРОНА» – логічну операцію «імплікація». За їх допомогою можна відобразити логіку більшості причинно-наслідкових зв'язків між аварійними подіями, що відбуваються на гідропорудах, та здійснити логіко-імовірнісне прогнозування різних аварійних ситуацій та аварій на гідровузлах [28, 148, 150, 164, 169].

Метод дерев відмов і несправностей дозволяє виконати синтез ймовірностей аварійних подій, отриманих за допомогою різних методів, враховувати складність ієрархічної структури гідровузлів як систем тощо [147]. При реалізації методу ймовірності базових (початкових) аварійних подій і станів можуть встановлюватися незалежно від поставленої задачі системного моделювання. При визначенні базових аварійних подій легко реалізувати принципи ієрархії і найменшої взаємодії. При цьому відносини ієрархії між подіями можуть визначатися в залежності від індивідуальних особливостей гідровузла, умов його експлуатації, суб'єктивних припущень щодо аварійних подій. При надмірній складності ієрархічної структури гідровузла як системи може використовуватися системно-інтегруючий підхід (агрегація) [147, 164, 228]. При цьому більш деталізовані події цілеспрямовано інтегруються у більш загальні і менш деталізовані події, що надалі вже вважаються базовими. Для реалізації принципу найменшої взаємодії в системі в якості базових підбираються стохастично незалежні події. В цьому випадку взаємодія між базовими аварійними подіями не ускладнює задачі моделювання логіки системних зв'язків та причинно-наслідкових відносин між аварійними подіями, що встановлюються при декомпозиції на системні одиниці гідровузла в цілому, окремих гідропоруд тощо.

В останні роки логіко-імовірнісні методи при аналізі ризику аварій і оцінці техногенної безпеки набули особливої популярності [195, 196, 202, 234]. Приклади їх використання при імовірнісному прогнозуванні аварій на гідровузлах і окремих гідропорудах наведено в [28, 147, 148, 150, 164, 169, 204, 234].

1.3.5. Сценарний підхід до прогнозування техногенних аварій

Практика показує, що аварії на гідровузлах носять системний характер і можуть виникати на різних етапах їх життєвого циклу (при будівництві, введенні в експлуатацію, при постійній експлуатації, виведенні з експлуатації, ремонтах, реконструкції), визначатися різними чинниками (природними, техногенними, природно-техногенними та різними їх сполученнями), відбуватися безпосередньо на гідроспорудах та в зонах їх впливу, через несправність устаткування і обладнання, що встановлюється на гідроспорудах, зокрема [147]:

- на водосховищах (включно акваторії та прилеглі території – береги, схили, прибережні зони тощо);
- на водопропускних спорудах (водоскидних, водовипускних та ін. спорудах), в тому числі на механічному устаткуванні (затворах, підйомних механізмах), встановленому на цих спорудах;
- на підпірних гідроспорудах – греблях та дамбах, що формують напірний фронт гідровузлів;
- в нижньому б'єфі гідровузлів (включно акваторії та прилеглі території);
- на гідроспорудах спеціального призначення (на гідроелектростанціях та гідроакумуючих станціях, насосних станціях та судноплавних шлюзах, на напірних басейнах, зрівнювальних резервуарах, турбінних водоводах тощо), в тому числі й на устаткуванні й обладнанні (гідроенергетичному, електротехнічному, механічному), що встановлюється на цих спорудах.

Час виникнення аварії на кожній індивідуальній гідроспоруді гідровузла є подією випадковою, що залежить від багатьох чинників. Місцеположення джерела аварії на кожній індивідуальній гідроспоруді, відповідних подій, явищ, процесів тощо, що можуть ініціювати можливу аварію на гідровузлі, також підкоряються імовірнісним законам.

Аварії, що відбувалися на гідровузлах, відбувалися за різними сценаріями, навіть коли причини, тип і конструкція споруди, основа тощо, були схожими. Причинно-наслідкові відношення між різними аварійними подіями та ста-

нами, що призводили до аварій на гідропорудах, часто виявлялися більш складними, щоб їх розглядати в рамках однієї моделі. Задачу прогнозування аварії на гідровузлі слід розглядати як слабо структуровану задачу, обтяжену невідомістю різного генезису, не тільки стохастичної, але і нестохастичної природи, пов'язаної з так званним «людським фактором» [147, 163]. Оскільки аварії на різних гідровузлах в сукупності подій не завжди можуть розглядатися як статистичні факти, то при прогнозуванні мова може йти скоріше про гіпотетичні сценарії аварій у формі певних логічних, а інколи і суб'єктивних, припущень.

При оцінці ймовірностей аварій на гідровузлах недостатньо мати репрезентативні вибірки даних щодо параметрів навантажень, показників властивостей матеріалів і ґрунтів тощо, застосувати строгі математичні моделі й сучасні обчислювальні технології. Тому існують пропозиції в основу прогнозування можливої аварії на гідровузлі покласти сценарний підхід [57, 99, 102, 128, 131-133, 163, 169, 197, 236], зокрема для того, щоб враховувати суб'єктивний фактор. В результаті сценарного моделювання складна, зазвичай, неструктурована або «слабо структурована» задача прогнозування аварії на гідровузлі, може бути зведена до кількох (за кількістю визначених гіпотетичних сценаріїв) «більш структурованих» задач прогнозування аварії – за окремими сценаріями її виникнення й розвитку, що можуть описуватися простішими математичними моделями з меншим числом визначальних факторів та параметрів [163, 169].

Сценарне моделювання аварій з використанням евристичних прийомів причинно-наслідкового аналізу, методів системно-структурного і абстрактно-логічного аналізу дозволяє наблизитись до адекватних оцінок ймовірностей аварій на гідровузлах. При цьому не стільки якість даних та математичних моделей, скільки обґрунтованість модельних сценаріїв, побудованих в тому числі і на подіях-припущеннях, визначає наскільки адекватною виявиться оцінка ймовірності аварії на гідровузлі – з врахуванням індивідуальних особливостей гідропоруд та умов навколишнього середовища [163, 169].

В рамках сценарного моделювання при прогнозуванні аварій на гідровузлах й оцінці ймовірностей різних аварійних подій, зокрема при імовірнісних ро-

зрахунках стійкості і міцності гідроспоруд, їх конструкцій та основ, працездатності устаткування тощо, можуть використовуватися різні підходи, методи й моделі: статистичні методи; методи параметричної й системної теорій надійності; методи рандомізації традиційних детерміністичних моделей та розрахункових схем; логіко-імовірнісні методи. Сценарний підхід дозволяє поєднати можливості всіх цих методів, використати їх як для оцінки ймовірностей окремих аварійних подій в залежності від наявних даних, так і здійснити синтез оцінок, отриманих за різними сценаріями [128, 131-133, 163, 169].

1.4. Проблеми кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах, мета та наступні задачі дослідження

Головною проблемою кількісної оцінки ризику аварії на гідровузлі є не те, чи можна оцінити ризик взагалі, оскільки завжди існує можливість квантифікувати будь-яке явище, а те, наскільки коректною і адекватною буде ця оцінка [14, 146, 147, 185, 187, 198, 199, 201, 209, 216, 218-220, 224, 225, 234, 235].

Гідровузли, у складі гідроспоруд різного призначення, являють собою надзвичайно складні природно-технічні системи, розвиток яких відбувається під впливом великої кількості різноманітних факторів – як зовнішніх – чинників навколишнього середовища, так і внутрішніх – системних зв'язків [28, 40, 50, 61, 68, 85, 89, 171, 172]. Як складні синергетичні системи, гідровузли та окремі гідроспоруди у їх складі, можуть поєднувати в собі велику кількість різного роду конструктивних, функціональних і розрахункових системних одиниць, від працездатності кожної з яких в тій чи іншій мірі залежить надійність та безпека гідровузла або гідроспоруди у цілому. При цьому моделювання гідровузлів і окремих гідроспоруд як систем викликає значні труднощі, оскільки ці об'єкти не мають чітко вираженої мережевої структури і окремі структурні одиниці можуть допускати різні ступені формалізації задачі системного моделю-

вання й вимагати різних підходів до її вирішення [28, 89]. Унікальність гідровузлів як природно-технічних систем, складність їх системної організації, синергізм, невизначеність, різноманітність чинників аварійності – все це ускладнює задачу прогнозування аварій та кількісну оцінку ризику аварій на гідровузлах.

Аварії на гідровузлах можуть бути пов'язані з загрозами для життя й здоров'я людей, стану довкілля, важкими соціально-економічними і екологічними наслідками. Недоврахування того або іншого фактора аварійності, в тому числі і можливості реалізації нетипового сценарію аварії, що не мав історичних аналогів, може мати непередбачувані наслідки. У той же час, виявити серед можливих причин аварій і порушень на гідровузлах визначальні для конкретного, індивідуального об'єкта фактори лише формальними засобами дуже складно.

Аварії на гідровузлах можуть розвиватися за різними сценаріями [83, 164, 169]. Тому при моделюванні сценаріїв аварій на гідровузлах необхідно, по-перше, виходити з потенційної можливості настання різних аварійних подій і ситуацій, здатних призвести до аварії, по-друге, враховувати можливість реалізації гіпотетичних, в тому числі і нетипових сценаріїв [119, 125, 144, 222].

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, і які підлягають дослідженню, слід виділити такі:

1) багатофункціональність гідроспоруд гідровузлів; гідровузли в цілому, гідроспоруди, їх конструкції, устаткування і обладнання тощо одночасно можуть виконувати кілька функцій, причому деякі з функцій є постійними, інші – виникають за потребою, в тому числі і у випадкові моменти часу;

2) мінливість навантажень на гідроспоруди і, відповідно, функціональних запитів (до споруд, устаткування і обладнання), що можуть змінюватися в широкому діапазоні від деяких мінімальних до максимальних розрахункових;

3) з точки зору системної організації при максимальних розрахункових навантаженнях і функціональних запитах гідровузли і окремі гідроспоруди, зазвичай, являють собою функціонально не надмірні, не зарезервовані системи; в той же час діапазон можливих навантажень і функціональних запитів на гідрос-

порудах є таким, що на гідровузлах і окремих гідроспорудах як на системах може виникати значна надмірність; наприклад, якщо мова йде про експлуатаційний водоскид з кількома водоскидними трактами, або водоскидний фронт у складі кількох водопропускних споруд, то для пропуску максимального розрахункового паводку передбачається використання всіх водопропускних споруд і трактів експлуатаційного водоскиду (тобто надмірність при цьому відсутня), тоді як при скиді паводків з витратами води, що є меншими за максимальну розрахункову витрату, може бути достатнім використання одного або кількох водопропускних трактів (виникає надмірність);

4) на гідроспорудах може використовуватися й структурна надмірність – додаткові елементи понад мінімально необхідних для виконання спорудою заданих функцій, які, зазвичай, не дублюють можливостей структурних одиниць, що резервуються, але можуть суттєво поліпшувати умови їх роботи (різного роду спряження, перехідні зони і фільтри, зуби і бетонні «подушки» в основах, цементация, облицювання, кріплення, додаткові протифільтраційні і дренажні пристрої, ребра жорсткості, технологічне армування тощо);

5) особливим фактором, що впливає на надійність й безпеку сучасних гідровузлів, є широке використання на гідроспорудах контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) і впровадження сучасних автоматизованих систем контролю стану гідроспоруд [211, 237], що, з однієї сторони, дозволяє оперативно реагувати на зміну стану гідроспоруд [234], з іншої, може провокувати аварійні ситуації на гідроспорудах внаслідок збоїв і прийняття помилкових рішень [176];

б) важливе значення при моделюванні аварій на гідровузлах і окремих гідроспорудах може мати врахування дії так званих спільних причин [28] – відповідних умов експлуатації або подій (наприклад, екстремальних паводків, землетрусів тощо), які спричиняють вплив на всі елементи системи одночасно.

Аналіз сучасних підходів, методів, моделей оцінки надійності і безпеки та управління безпекою гідровузлів показав, що подолання вищенаведених проблем можливе в рамках сценарного підходу з вирішенням наступних задач.

1. Розвинути сценарний підхід [99, 102, 128, 131-133, 139, 163, 169, 197, 215, 236] до імовірнісного прогнозування аварій та оцінки ризиків аварій на гі-

дровузлах з використанням методу Байєса [19, 20, 22, 42, 45, 51, 53, 54, 57, 60, 94, 117, 133, 135, 137, 188, 189, 205, 208, 212, 214, 230, 231].

2. Застосувати метод Байєса до імовірнісного прогнозування нетипових системних аварій на гідровузлах, пов'язаних з відмовами автоматичних засобів регулювання [203, 232, 233]; розв'язати задачу оцінки ймовірності відмови резервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та задачу оцінки ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження.

3. Удосконалити метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускнуою здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням та розробити метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускнуою здатністю як неоднорідної системи з врахуванням пріоритету виконання різних функціональних запитів в рамках байєсівського підходу;

4. В межах сценарного підходу до оцінки ймовірностей реалізації різних сценаріїв аварій і ризику збитків від аварій з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розробити метод оцінки значущості за Фусселем – Веслі аварійних подій на гідровузлі за ймовірністю та ризиком збитків з метою їх ранжирування за пріоритетом безпеки;

5. На підставі сценарного підходу до оцінки ризиків збитків з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розробити метод обґрунтування зліченої множини модельних сценаріїв аварій на гідровузлі та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Обґрунтовано актуальність проблеми кількісної оцінки ризиків аварій на гідротехнічних спорудах гідровузлів України. Проаналізовано основні підходи до аналізу і оцінки техногенної безпеки та управління техногенною безпе-

кою й визначено перспективи ризик-орієнтованого напрямку досліджень в області техногенної безпеки гідровузлів. Сформульовано основні задачі дослідження ризиків техногенних аварій. Проаналізовано існуючі підходи до оцінки ймовірностей техногенних аварій, методи і моделі.

2. Обґрунтовано доцільність використання імовірнісного підходу до прогнозування аварій на гідровузлах. Встановлено, що задачі прогнозування аварій на гідровузлах є складними системними задачами, обтяженими як параметричною, так і структурною невизначеністю чинників, більшість з яких важко віднести не лише до детерміністичних фактів, а й до фактів, що мають статистичне походження. Показано, що аналіз чинників аварій на гідровузлах та їх формалізація в повній мірі можливі лише на рівні подій-припущень, ймовірності яких, у більшості випадків, мають як об'єктивну, так і суб'єктивну природу.

3. Проаналізовано особливості гідровузлів як складних синергетичних систем та визначено основні проблеми імовірнісного прогнозування аварій на гідровузлах з метою кількісної оцінки ризиків аварій. Показано, що вирішення проблем імовірнісного прогнозування аварій та кількісної оцінки ризику аварій на гідровузлах з врахуванням різних факторів, як природних, так і техногенних, можливе в рамках сценарного підходу, який орієнтується на розробку різних модельних сценаріїв аварій та використання різних підходів і методів до оцінки ймовірностей аварійних подій. Такий підхід дозволяє складні, неструктуровані або «слабо структуровані» задачі прогнозування аварій на гідровузлах, обтяжені невизначеністю різної природи, зводити до «більш структурованих» задач прогнозування складних аварійних подій за окремими модельними сценаріями, що можуть описуватися простішими формальними моделями. Сценарне моделювання в рамках імовірнісного підходу дозволить поєднати можливості різних методів та моделей, здійснити синтез оцінок ймовірностей аварій та ризиків аварій, отриманих за допомогою різних методів за окремими сценаріями.

4. Сформульовано мету та наступні задачі дослідження.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА РИЗИКІВ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ НА ОСНОВІ МЕТОДУ БАЙЄСА

2.1. Загальні положення, означення та твердження

Нехай деяка аварійна подія A_i , що відбувається в системі, є несумісною з іншими можливими аварійними системними подіями і з ймовірністю $P(A_i)$ здатна викликати збиток $D(A_i)$ [117, 132, 133, 149, 221, 223].

Означення 1. Ризиком збитку від аварійної події A_i , несумісної з іншими аварійними подіями, називатимемо величину $R(A_i, D_i)$, яка визначається як добуток імовірності $P(A_i)$ події A_i на величину викликаного нею збитку $D(A_i)$:

$$R(A_i, D_i) = P(A_i) \cdot D(A_i). \quad (2.1)$$

Розглянемо деяку злічену множину (групу) \mathbf{E} , в загальному випадку сумісних аварійних подій-причин E_j , $j = \overline{1, m}$, в системі \mathbf{S} , які можуть призводити до ідеалізованих, в загальному випадку теж сумісних, аварійних подій-наслідків F_i , $i = \overline{1, n}$, що належать деякій зліченній множині (групі) \mathbf{F} , яка визначає різні форми і види аварії A в системі \mathbf{S} : $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$.

Пов'яжемо виникнення кожної з аварійних подій-наслідків $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, з аварійними подіями-причинами $E_j \in \mathbf{E}$, $j = \overline{1, m}$, умовними структурними функціями $\Psi(\mathbf{S} | F_i)$ безпеки (надійності, безвідмовності) системи \mathbf{S} :

$$\Psi(\mathbf{S} | F_i) : \mathbf{E} \rightarrow F_i, i = \overline{1, n}. \quad (2.2)$$

Задамо загальну структурну функцію безпеки (надійності, безвідмовності) системи \mathbf{S} із врахуванням різних форм і видів системної аварії A :

$$\Psi(\mathbf{S}) : \mathbf{F} \rightarrow A. \quad (2.3)$$

Покладемо, що аварія в системі \mathbf{S} може виникнути з будь-якої з аварійних подій-причин $E_j \in \mathbf{E}$, $j = \overline{1, m}$, відбуватиметься в різних формах або видах аварії $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, але розвиватиметься лише за одним зі встановлених у вигляді подій-припущень сценаріїв $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$, ймовірністю

$$P(A_i) = P(A_i | A) \cdot P(A), \quad (2.4)$$

де $P(A_i | A)$ – умовна ймовірність аварії в системі \mathbf{S} за сценарієм A_i ; $P(A)$ – повна ймовірність виникнення аварії в системі \mathbf{S} , яку визначаємо за допомогою структурної функції $\Psi(\mathbf{S})$ безпеки (надійності, безвідмовності) системи, що в загальному випадку відображає множину аварійних подій-причин \mathbf{E} через множину аварійних подій-наслідків \mathbf{F} в системну аварію A :

$$\Psi(\mathbf{S}) : \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{F} \rightarrow A. \quad (2.5)$$

Означення 2. Сценарієм A_i можливої аварії A в системі \mathbf{S} називатимемо деяку ідеалізовану аварійну подію-припущення, несумісну з іншими визначеними в якості модельних сценаріїв аварії A ідеалізованими аварійними подіями-припущеннями у складі повної групи подій:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = P(A), \sum_{i=1}^n P(A | A_i) = 1; (A | A_i) \wedge (A | A_k) = \emptyset; i \neq k; i, k = \overline{1, n}, \quad (2.6)$$

$$P(A_i | A) = \frac{P(A | A_i) \cdot P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A | A_i) \cdot P(A_i)}, \quad (2.7)$$

де $P(A_i)$ – ймовірність реалізації модельного 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 .

Означення 3. Повним (сумарним) ризиком збитків $R(D, A)$ від аварії A з врахуванням різних модельних сценаріїв її реалізації $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$, називатимемо суму добутків $P(A_i) \cdot D(A_i)$:

$$R(D, A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot D(A_i), \quad (2.8)$$

де $P(A_i)$ – ймовірність реалізації модельного сценарію A_i аварії A ; $D(A_i)$ – збиток від аварії A , якщо вона відбувається за сценарієм A_i .

Означення 4. «Відносною вагою» $P(A | A_i)$ сценарію A_i за ймовірністю його виникнення при реалізації аварії A за формою (видом) $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, називатимемо величину:

$$P(A | A_i) = \frac{P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}. \quad (2.9)$$

де $P(F_i)$ – ймовірність відповідної форми або виду аварії A в системі \mathbf{S} .

Використання імовірнісної міри щодо «ваг» (2.9) виправдовуємо тим, що будь-яка нормалізована система не негативних величин підкоряється аксіомам теорії ймовірностей [112]. Відповідно ймовірність $P(A | A_i)$ далі визначатиметься як умовна ймовірність виникнення аварії A в системі за сценарієм A_i .

Твердження 1. Якщо хоча б за однією з n форм (видів) аварії $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, з якими можуть пов'язуватися різні збитки $D(A_i)$ в результаті системної

аварії за відповідними сценаріями A_i , «відносна вага» $P(A|A_i) = \frac{P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}$ де-

якого сценарію A_i за ймовірністю його виникнення відрізняється від відповід-

них «відносних ваг» $P(A|A_k) = \frac{P(F_k)}{\sum_{i=1}^n P(F_k)}$ інших сценаріїв за ймовірністю їх ви-

никнення для $\forall F_k \in \mathbf{F}, k = \overline{1, n}, k \neq i$, то при $P(F_i) > P(F_k)$ та $D(A_i) < D(A_k)$ су-

марний ризик збитків $R(D, A)$ за всіма модельними сценаріями $A_i \in \mathbf{A}, i = \overline{1, n}$,

системної аварії буде строго меншим за суму добутків $P(F_i) \cdot D(A_i)$:

$$R(D, A) < \sum_{i=1}^n P(F_i) \cdot D(A_i). \quad (2.10)$$

Твердження 2. Якщо форми (види тощо) аварії $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$, 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 ймовірності $P(F_i) = P(F)$,

$i = \overline{1, n}$, то сумарний ризик збитків $R(D, A)$ за всіма сценаріями $A_i \in \mathbf{A}, i = \overline{1, n}$,

системної аварії буде рівним добутку ймовірності $P(F)$ на суму збитків $D(A_i)$:

$$R(D, A) = P(F) \cdot \sum_{i=1}^n D(A_i). \quad (2.11)$$

Твердження 3. Якщо з різними формами (видами) аварії $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$, і відповідними сценаріями аварії $A_i, i = \overline{1, n}$, пов'язуються однакові збитки і їх

величина складає $D(A_i) = D(A), i = \overline{1, n}$, то сумарний ризик збитків $R(D, A)$ за

всіма формами (видами) аварії $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$ і відповідними модельними сцена-

ріями A_i , $i = \overline{1, n}$, буде рівним добутку повної ймовірності системної аварії $P(A)$ та збитку $D(A)$:

$$R(D, A) = P(A) \cdot D(A). \quad (2.12)$$

2.2. Загальна постановка задачі кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах на основі методу Байєса

Однією з основних причин застосування методу Байєса при кількісній оцінці ризиків аварій на гідровузлах є використання при оцінці ймовірностей різного роду аварійних подій, що відбуваються на гідроспорудах та в навколишньому середовищі, поняття суб'єктивної (індивідуальної, байєсівської) ймовірності, де різноманітні аварійні події, якими описуються причини, умови виникнення аварій, форми і види аварій на гідроспорудах, трактуються, у більшості випадків, як події-припущення [28].

Останнє пов'язано з тим, що стани і поведінка гідровузлів, окремих гідроспоруд в їх складі тощо як складних синергетичних систем обумовлюється впливом настільки великої кількості факторів, а їх стани визначаються настільки значною кількістю параметрів, що всі вони принципово не можуть бути врахованими в рамках класичних динамічних моделей. Кількість факторів і параметрів, що мають враховуватися при оцінці надійності і безпеки гідровузлів, може бути практично необмеженою, а більшість з них, зазвичай, набувають випадкових значень, а інколи є принципово невизначеними.

З метою подолання невизначеності даних щодо факторів та параметрів, які можуть визначати поведінку та стан індивідуальних гідровузлів, окремих гідроспоруд в їх складі тощо як складних синергетичних систем, при оцінці їх

надійності й безпеки використовують імовірнісні моделі та кількісні оцінки ризиків аварій як комбінацій ймовірностей аварійних подій і їх наслідків.

Імовірнісний або ризик-орієнтований підхід до вирішення задач оцінки надійності і безпеки гідровузлів вважається альтернативою класичному (детерміністичному) підходу, що використовується для забезпечення їх надійності і безпеки як потенційно небезпечних об'єктів, спрямованому на реалізацію концепції «абсолютної надійності» або ж «абсолютної безпеки» гідроспоруд. Незважаючи на зусилля вчених та інженерів по удосконаленню традиційних методів розрахунку гідроспоруд, обладнання та устаткування на гідровузлах, класичний підхід з орієнтацією на концепцію «абсолютної безпеки» виявився не здатним вирішити проблему аварійності, в тому числі і проблему катастрофічних аварій на гідровузлах, які, хоча й рідко, але все ж таки відбуваються і в наш час.

В рамках імовірнісного, ризик-орієнтованого підходу, для систем, аварії на яких пов'язані з катастрофічними соціально-економічними і екологічними наслідками, задачі техногенної безпеки можуть вирішуватися на основі так званої концепції (або принципу) «практично досяжного мінімального ризику» (as low as reasonably practicable risk principle, ALARP). Згідно з цим принципом для особливо відповідальних техногенних об'єктів з метою забезпечення їх надійності і безпеки оцінюються ризики аварій, які порівнюються з деякими допустимими величинами, які встановлюють межу терпимості техногенного ризику. Ризики аварій вважаються прийнятними в тих випадках, якщо вони є меншими за встановлену межу терпимості, і коли подальше їх зменшення є або практично неможливим (за наявних технологічних й економічних умов), або ціна такого зменшення є непропорційно великою порівняно з отриманим при цьому підвищенням надійності техногенного об'єкта [84].

Однак і при реалізації принципу ALARP виникає кілька проблем, які можуть бути вирішені в рамках байєсівського підходу.

При кількісних оцінках ризиків аварій як комбінацій ймовірностей аварійних подій та їх наслідків, завжди буде виникати проблема ситуативного обмеження розрахункової множини можливих аварійних подій-причин і подій-

наслідків в системі. Якщо припустити, що множина ймовірних аварійних подій в системі, які ініціюють різні наслідки (збитки тощо), необмежена, то повний (загальний, сумарний) ризик збитків може зростати необмежено [84]. Це означає, що деякими з можливих аварійних подій-причин і подій-наслідків, так чи інакше, треба нехтувати, обмежувати їх в рамках сценарного моделювання аварій зліченими, повними групами несумісних аварійних подій.

Аварії на гідровузлах можуть розрізнятися за характером наслідків (економічні, соціальні, екологічні тощо), величиною наслідків та за ймовірностями їх виникнення. З більш рідкісними аварійними подіями (менш ймовірними), зазвичай, пов'язані більш серйозні наслідки, і навпаки – з більш ймовірними – менш масштабні наслідки. При цьому, ризики збитків, взяті окремо для різних аварійних подій-наслідків, можуть виявитися практично однаковими [149].

Розглянемо, для прикладу, три сумісні небажані події, одна з яких з очікуваними збитками $D_1 = 10$ млн. гривень при ймовірності відповідної події $P_1 = 10^{-2}$, рік⁻¹, для іншої нехай $D_2 = 50$ млн. гривень при $P_2 = 2 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹, і нарешті $D_3 = 100$ млн. гривень при $P_3 = 10^{-3}$, рік⁻¹. В усіх цих випадках розрахункові ризики збитків як класичні добутки $R(D_i) = P_i \cdot D_i$ дорівнюють одній і тій же величині 0,1 млн. гривень на рік, тобто питання якою з цих подій можна «безболісно» знехтувати і не враховувати при оцінці повного ризику є відкритим.

Сутність байєсівського підходу до кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах, який нами пропонується, полягає в переоцінці апріорних ймовірностей аварійних подій, які можуть призвести до аварії на гідровузлі, що, в загальному випадку, є сумісними, за відомої повної ймовірності аварії, яка попередньо встановлюється одним з відомих методів (див. § 1.3), з врахуванням несумісності модельних сценаріїв аварії, апостеріорні ймовірності яких визначаються з використанням байєсівського перетворення ймовірностей.

Розглянемо детальніше основні аварійні події на гідровузлі.

Нехай подія A визначається як головна аварійна подія (аварія) на гідровузлі, а аварійні події F_i , $i = \overline{1, n}$, – як форми, види аварії, які можуть відбувати-

ся на окремих гідроспорудах, обладнанні ,тощо і які здатні прямо чи опосередковано призвести до аварії A за відповідними сценаріями $A_i, i = \overline{1, n}$.

Зауважимо, що ймовірність головної події (аварії) $P(A)$ може встановлюватися, наприклад, і за статистичними (історичними) даними про аварійність на аналогічних об'єктах. У випадку відсутності або неповноти статистичних даних щодо аварійності на аналогічних спорудах повна ймовірність аварії $P(A)$ на гідровузлі може оцінюватися за ймовірностями реалізації аварійних подій-причин $E_j \in \mathbf{E}, j = \overline{1, m}$, та відповідних форм (видів) аварії $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$, як подій-наслідків $E_j \in \mathbf{E}, j = \overline{1, m}$, наприклад, методами математичної теорії надійності, логіко-імовірнісними методами тощо (див. § 1.3). Оцінка ймовірностей $P(E_j) \in \mathbf{E}, j = \overline{1, m}$, як аварійних подій-причин на гідровузлі, та аварійних подій-наслідків $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$, в залежності від їх генезису, трактування тощо, при необхідності також може бути здійснена тими ж методами, що і оцінка ймовірності головної аварійної події (аварії).

У випадку, коли з різними аварійними подіями-наслідками $F_i \in \mathbf{F}, i = \overline{1, n}$, які безпосередньо призводять до аварії на гідровузлі (різними формами, видами аварії), пов'язуються однакові збитки від аварії, оцінка повного ризику збитків $R(D, A)$ від аварії суттєво спрощується і, згідно з твердженням 3 (див. § 2.1), ризик збитків $R(D, A)$ може прирівнюватися до добутку повної ймовірності аварії $P(A)$ на гідровузлі та відповідного збитку $D(A)$. Однак у більшості випадків збитки від аварій на гідровузлах суттєво залежать від форм і видів аварій. Останні, в свою чергу, залежать від типу гідроспоруд, виду конструкцій, основ тощо, тобто можуть залежати і від аварійних подій-причин, які ініціюють аварійні процеси на гідроспорудах і гідровузлі в цілому і визначають той чи інший сценарій виникнення і розвитку аварії на гідровузлі.

В § 2.1 дано формальне визначення терміну «сценарій аварії» (див. означення 2) як події-припущення серед інших подій-припущень, що є несумісними подіями і які формують повну групу подій. Показано, що ймовірність реалізації

окремого (одного з можливих) модельного сценарію аварії визначається за правилом (формулою) добутку ймовірностей (2.4): повної ймовірності виникнення аварії $P(A)$ та умовної ймовірності аварії за відповідним сценарієм $P(A_i | A)$, де умовна ймовірність аварії $P(A_i | A)$ за відповідним сценарієм A_i є байєсівською ймовірністю, яка визначається за формулою Байєса [167].

Як відомо, формула Байєса (теорема гіпотез) [29, 109] є наслідком правила добутку ймовірностей і формули повної ймовірності, яка, в свою чергу, є наслідком двох основних правил теорії ймовірностей – правила підсумування (об'єднання подій) і правила добутку (перетину подій) ймовірностей. Формула повної ймовірності, зокрема, дозволяє оцінити ймовірність аварії за відомими ймовірностями сценаріїв її реалізації [23]:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A | A_i) \cdot P(A_i), \quad (2.13)$$

де $P(A | A_i)$ – умовна ймовірність аварії за умови реалізації сценарію A_i ; $P(A_i)$ – безумовна ймовірність сценарію A_i ; n – кількість модельних сценаріїв, які можуть призвести до аварії, що формують повну групу.

Або, з врахуванням (2.4),

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A_i | A) \cdot P(A). \quad (2.14)$$

Тобто, згідно з однією з фундаментальних теорем теорії ймовірностей [106], для кожного зі сценаріїв аварій, $i = \overline{1, n}$, маємо:

$$P(A | A_i) \cdot P(A_i) = P(A_i | A) \cdot P(A). \quad (2.15)$$

Серед аварійних подій-причин (див. § 2.1) нами була виділена група аварійних подій-наслідків з n подій (форми, види аварій на гідроспорудах тощо),

$F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, з якими власне і пов'язуються різні збитки $D(A_i)$ в результаті аварії на гідровузлі за відповідними сценаріями $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$. За ймовірностями цих подій $P(F_i)$, $i = \overline{1, n}$, згідно з означенням 4 встановлюються «ваги» $P(A | A_i)$, за якими визначаються умовні ймовірності виникнення аварії A в системі за різними сценаріями A_i [117, 132, 133, 149, 167, 221, 223].

Оскільки ймовірності $P(F_i)$, $i = \overline{1, n}$, можуть визначатися незалежно, різними методами (див. § 1.3) й поза межами основної задачі, то їх можна використати в якості апріорних значень ймовірностей $P(A_i)$ відповідних сценаріїв $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$, тобто $P(A_i) = P(F_i)$. Тоді, якщо повна ймовірність аварії $P(A)$ відома, то згідно з формулою Байєса можна обчислити умовну ймовірність $P(A_i | A)$ сценарію A_i за умови, що аварія A відбудеться саме за цим сценарієм:

$$P(A_i | A) = \frac{P(A | A_i) \cdot P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(A | A_i) \cdot P(F_i)}. \quad (2.16)$$

Звідки, з врахуванням (2.9), повна ймовірність сценарію A_i буде:

$$P(A_i) = \frac{\frac{P^2(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P^2(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)} \right)} \cdot P(A), \quad (2.17)$$

що дозволяє при оцінці сумарного ризику збитків від аварії на гідровузлі скористатись класичною формулою (2.8).

2.3. Приклад оцінки сумарного ризику збитків від аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1

Басейн добового регулювання (БДР) Зарамагської ГЕС-1, що будується в Північній Осетії (Росія) на ріці Ардон (притока Тереку), є найвідповідальнішою структурною одиницею гідроенергетичного комплексу у складі гідроспоруд головного вузла (Головна ГЕС) і гідроспоруд власне Зарамагської ГЕС-1 – унікальної гідроелектростанції на пострадянському просторі, з розрахунковим напором на турбінах в 619 м [48]. За чинними нормами Російської Федерації [141] гідроспоруди комплексу віднесені до II класу відповідальності, тоді як БДР Зарамагської ГЕС-1 – до I, найвищого класу.

Конструктивно БДР Зарамагської ГЕС-1 являє собою огороження у вигляді бетонної гравітаційної споруди зі сторони р. Ардон. Для недопущення неконтрольованого переливу води через гідроспоруду передбачено влаштування аварійного шахтного водоскиду з вільним переливом води.

Конструктивні особливості гідроспоруди визначають три можливі види аварії і відповідні їм модельні сценарії аварійного виливу води з БДР [150]:

вид аварії F_1 , сценарій A_1 – руйнування (вивал) секції бетонної конструкції огороження БДР, в тому числі при максимальному розрахунковому землетрусі (МРЗ), що має період повторення 1000 років, з виливом води в сторону р. Ардон; збитки від аварії оцінюються в 95% від вартості будівництва ГЕС;

вид аварії F_2 , сценарій A_2 – неконтрольований перелив води через гребінь бетонної конструкції огороження БДР в сторону р. Ардон; сукупні збитки від аварії за цим сценарієм оцінюються майже в 53% від вартості будівництва Зарамагської ГЕС-1;

вид аварії F_3 , сценарій A_3 – аварійний вилив води через шахтний водоскид в сторону р. Ардон; сукупні збитки можуть скласти біля 2% від вартості будівництва Зарамагської ГЕС-1.

При моделюванні видів аварії F_2 , F_3 та відповідних їм сценаріїв аварійного виливу води A_2 , A_3 враховувалися також наступні аварійні ситуації (форми аварії): $F_{2.1}$ – руйнування турбінного водоводу з перекриттям гідравлічного тракту; $F_{2.2}$ – втрата пропускної здатності гідроагрегатів ГЕС; $F_{2.3}$ – блокування шахтного водоскиду (тільки для F_2 та сценарію A_2 , відповідно).

Всі події-причини можливої аварії в системі включно події-наслідки F_1 , F_2 , F_3 та $F_{2.1}$, $F_{2.2}$, $F_{2.3}$ розглядалися як стохастично незалежні, сумісні події.

2.3.1. Оцінка ймовірностей аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1

Оцінка ймовірностей аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 здійснювалася логіко-ймовірнісним методом дерев відмов і несправностей. Згідно з цим методом ймовірності аварійних подій, що є наслідками, встановлюються за відомими ймовірностями аварійних подій-причин в залежності від дії логічних операторів, що моделюють логіку причинно-наслідкових зв'язків (див. § 1.3.4).

Діаграми дерева відмов і несправностей, за яким розраховувалися ймовірності аварійного виливу води з БДР Зарамагської ГЕС-1 при різних аварійних ситуаціях, наведено нижче на рис. 2.1÷2.6. На діаграмах дерева відмов і несправностей колами показані базові події, якими описувалися аварійні події на гідроспорудах, відмови та несправності систем та пристроїв, здатні запустити аварійні процеси, заокругленими прямокутниками – події-умови, які можуть сприяти розвитку аварійних подій-наслідків. Прямокутниками показані аварійні події-наслідки, ромбами – нерозкриті гілки дерева відмов і несправностей.

Ймовірності базових аварійних подій-причин та подій-умов, які можуть ініціювати і обумовлювати аварійні події-наслідки, встановлювалися до розрахунку дерева відмов і несправностей. Їх значення зведено в табл. 2.1.

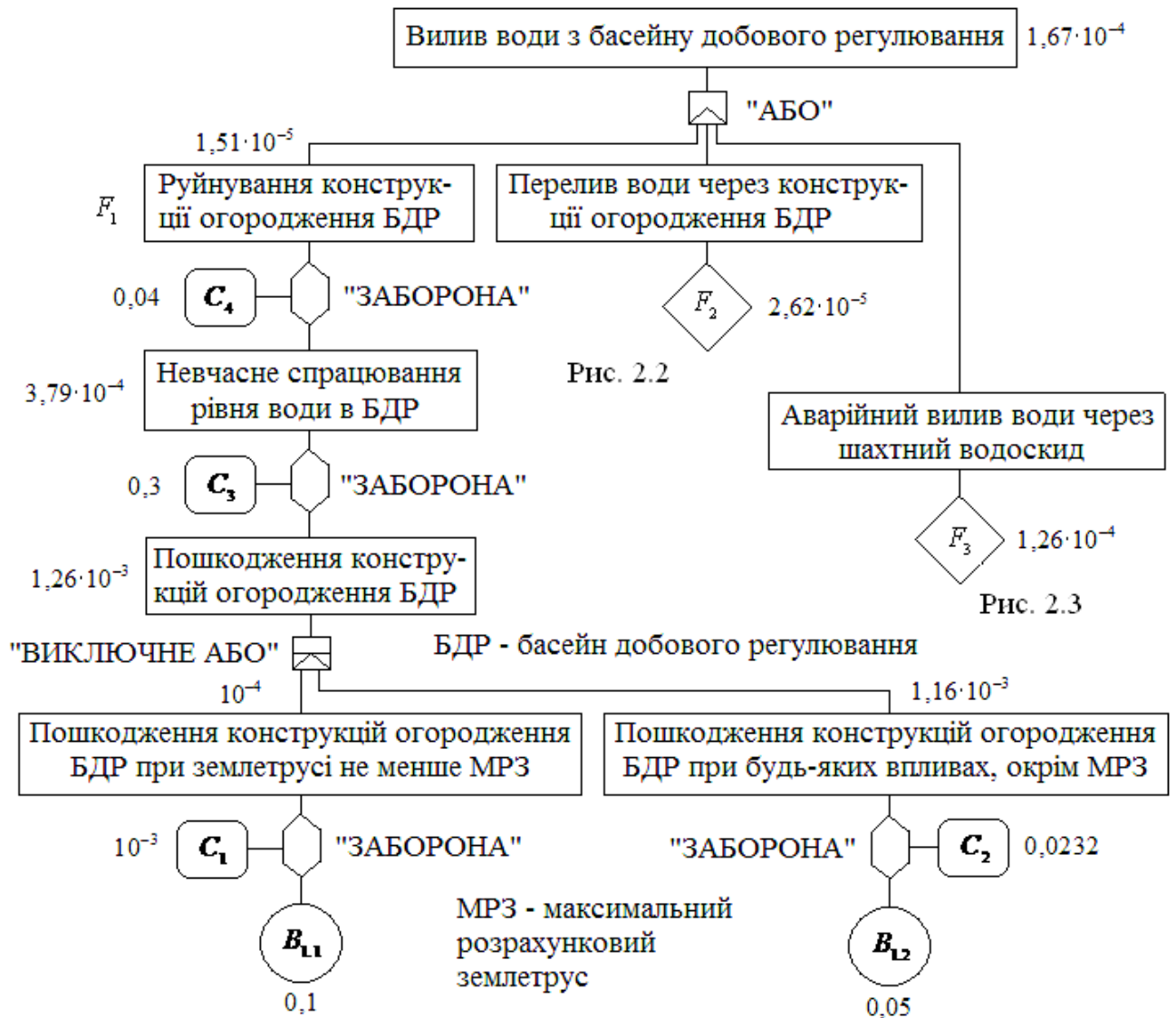


Рис. 2.1. Вершинні події діаграми дерева відмов і несправностей для оцінки ймовірностей аварійного виливу води з БДР Зарамагської ГЕС-1 (продовження діаграми див. на рис. 2.2, 2.3)

Таблиця 2.1

Базові події-причини і події-умови, що можуть ініціювати та обумовлювати аварійні події-наслідки на БДР Зарамагської ГЕС-1, та їх ймовірності

Подія	Опис події	Ймовірність
1	2	3
$V_{1.1}$	Пошкодження бетонних конструкцій огороження БДР при землетрусі не меншому МРЗ	0,1

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
$B_{1.2}$	Пошкодження бетонних конструкцій огороження БДР з будь-яких причин, окрім землетрусів \geq МРЗ	0,05
C_1	Землетрус \geq МРЗ, з періодом повторення 1000 років	10^{-3} , рік ⁻¹
C_2	Будь-яке небезпечне сполучення навантажень тощо, окрім землетрусів \geq МРЗ	0,0232, рік ⁻¹
C_3	Системна помилка оператора в умовах стресу, викликаного аварійною ситуацією	0,3
C_4	Втрата живучості ушкодженої конструкції	0,04
$B_{2.1}$	Пошкодження турбінного водоводу при сейсмі \geq МРЗ	0,1
$B_{2.2}$	Пошкодження турбінного водоводу з будь-яких причин, окрім землетрусів \geq МРЗ	0,05
$B_{2.3}$	Відмова АСУ через зовнішні впливи	0,0242, рік ⁻¹
$B_{2.4}$	Відмова АСУ з внутрішніх причин	0,15, рік ⁻¹
$B_{2.5}$	Ремонт гідроагрегату	0,1, рік ⁻¹
$B_{2.6}$	Відмова направляючого апарата гідротурбіни	0,036, рік ⁻¹
$B_{2.7}$	Обрив ЛЕП через вітрові і льодові навантаження	0,01, рік ⁻¹
$B_{2.8}$	Обрив ЛЕП через землетруси, зсуви, селі тощо	0,0242, рік ⁻¹
$B_{2.9}$	Пошкодження труби для промивки наносів при землетрусі не меншому МРЗ	0,1
$B_{2.10}$	Пошкодження труби для промивки наносів з будь-яких причин, окрім землетрусів не менших МРЗ	0,05
$B_{2.11}$	Пошкодження конструкції шахтного водоскиду при землетрусі не меншому МРЗ	0,1
$B_{2.12}$	Пошкодження конструкції шахтного водоскиду з будь-яких причин, окрім землетрусів не менших МРЗ	0,05
C_5	Невчасне відновлення лінії видачі потужності	0,1
C_6	Системна помилка оператора при діях згідно з регламентом в умовах стресу, викликаного аварією	0,1

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
$B_{2.13}$	Зовнішнє блокування шахтного водоскиду зі сторони нижнього б'єфу	0,0242, рік ⁻¹
$B_{2.14}$	Зовнішнє блокування шахтного водоскиду зі сторони верхнього б'єфу	0,15, рік ⁻¹
B_3	Шахтний водоскид у працездатному стані (ймовірність події визначалася як доповнення до одиниці ймовірності реалізації аварійної ситуації $F_{2.3}$)	0,828

Ймовірності базових аварійних-подій та подій-умов, що можуть ініціювати і обумовлювати розвиток аварійних подій-наслідків, встановлювалися та оцінювалися за даними, наведеними в [28, 91, 159, 168, 176, 209-211, 225].

Для оцінки щорічної ймовірності реалізації події-умови C_2 формувалася повна група у складі подій C_1 і C_2 . Покладалося, що при розрахунковому строку служби гідроспоруди $T_p = 100$ років (як для споруд I класу згідно з російськими нормами [141]) повна ймовірність реалізації події-умови C_1 буде:

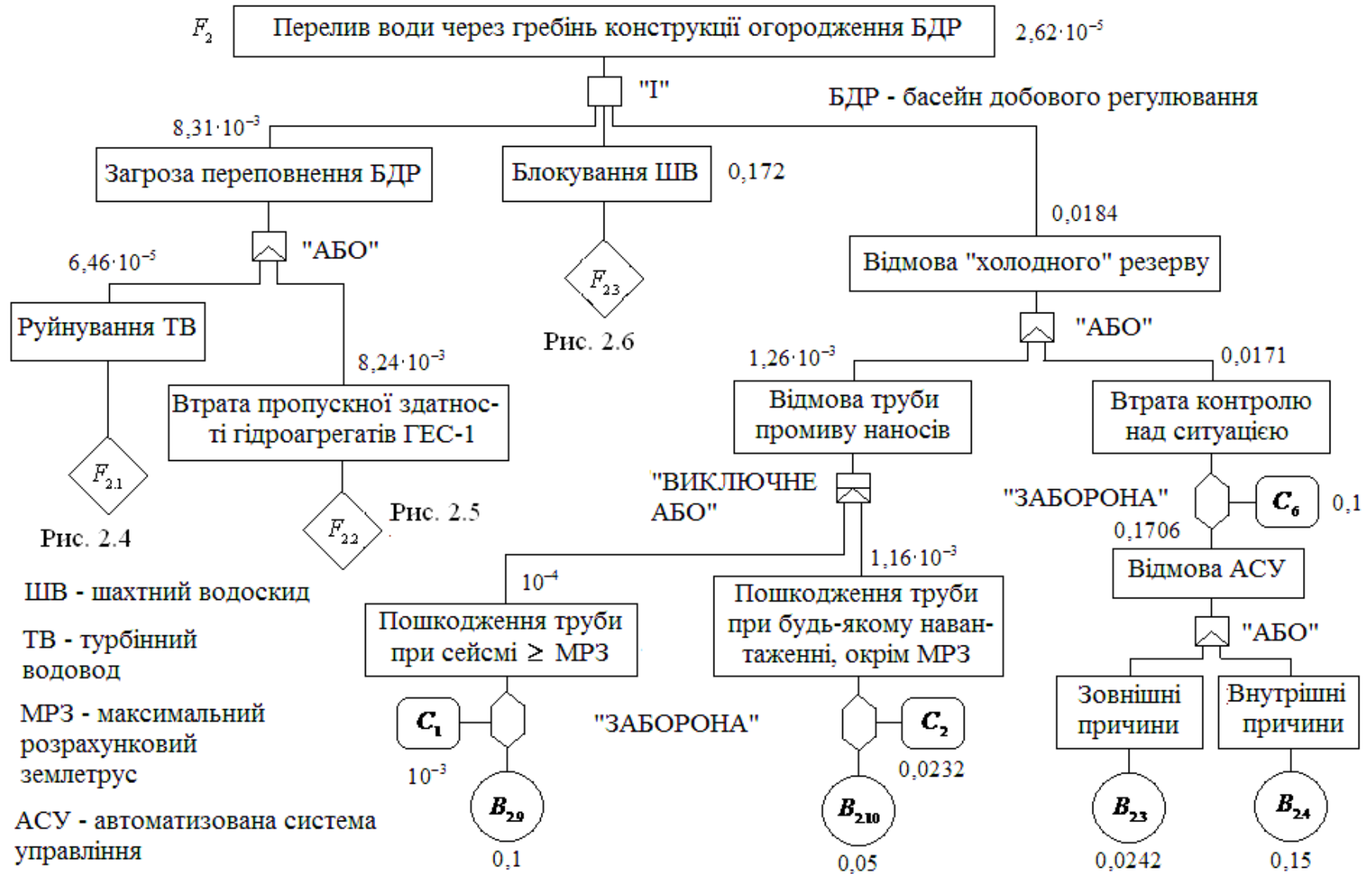
$$P(C_1, T_p) = 1 - [1 - P(C_1)]^{T_p} = 1 - (1 - 10^{-3})^{100} = 0,0952. \quad (2.18)$$

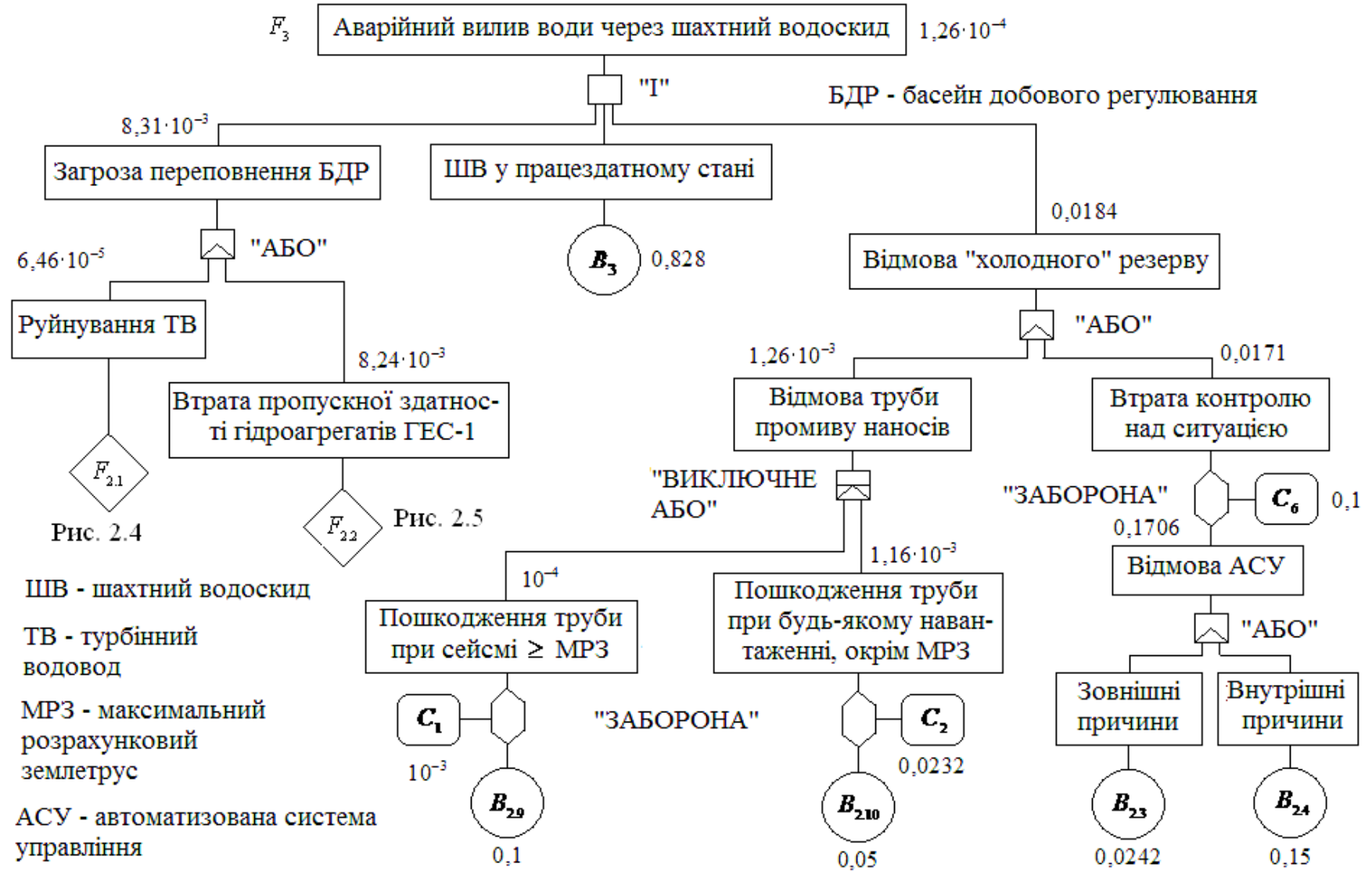
Тоді, з врахуванням умови формування повної групи подій, повна ймовірність реалізації події-умови C_2 за період $T_p = 100$ років:

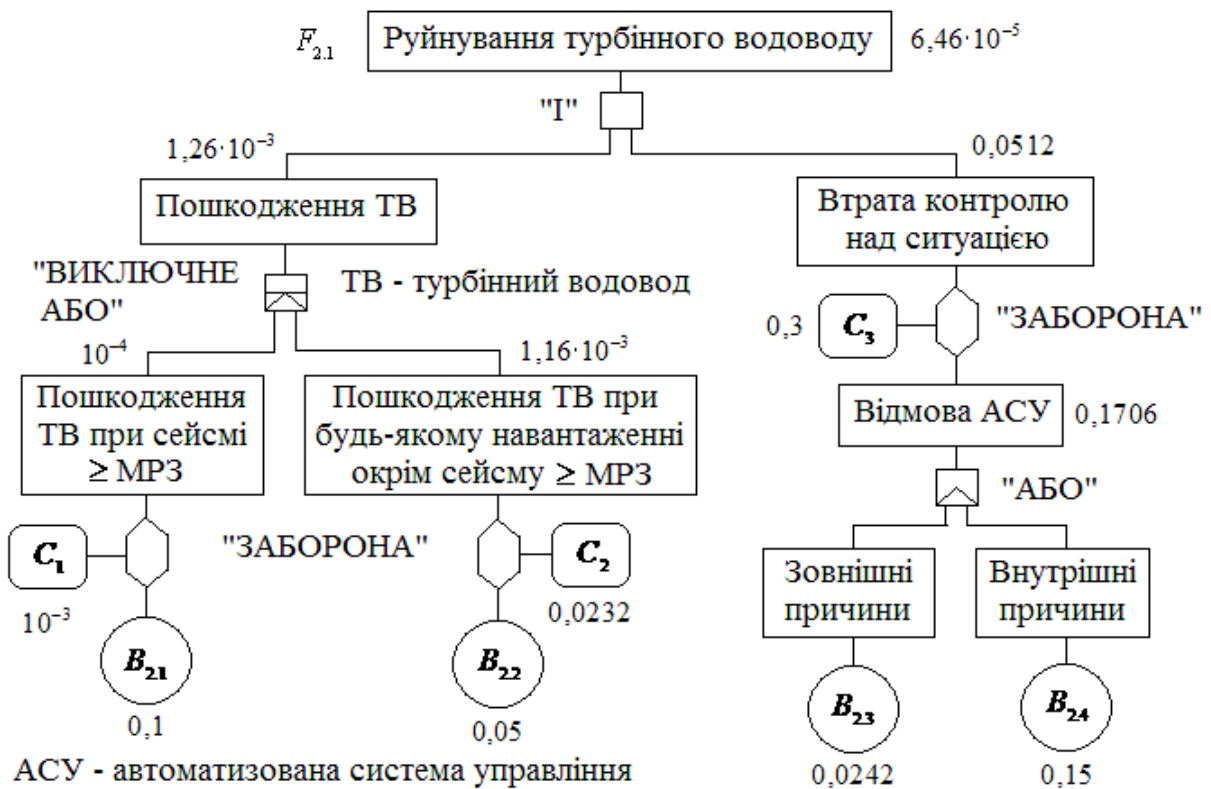
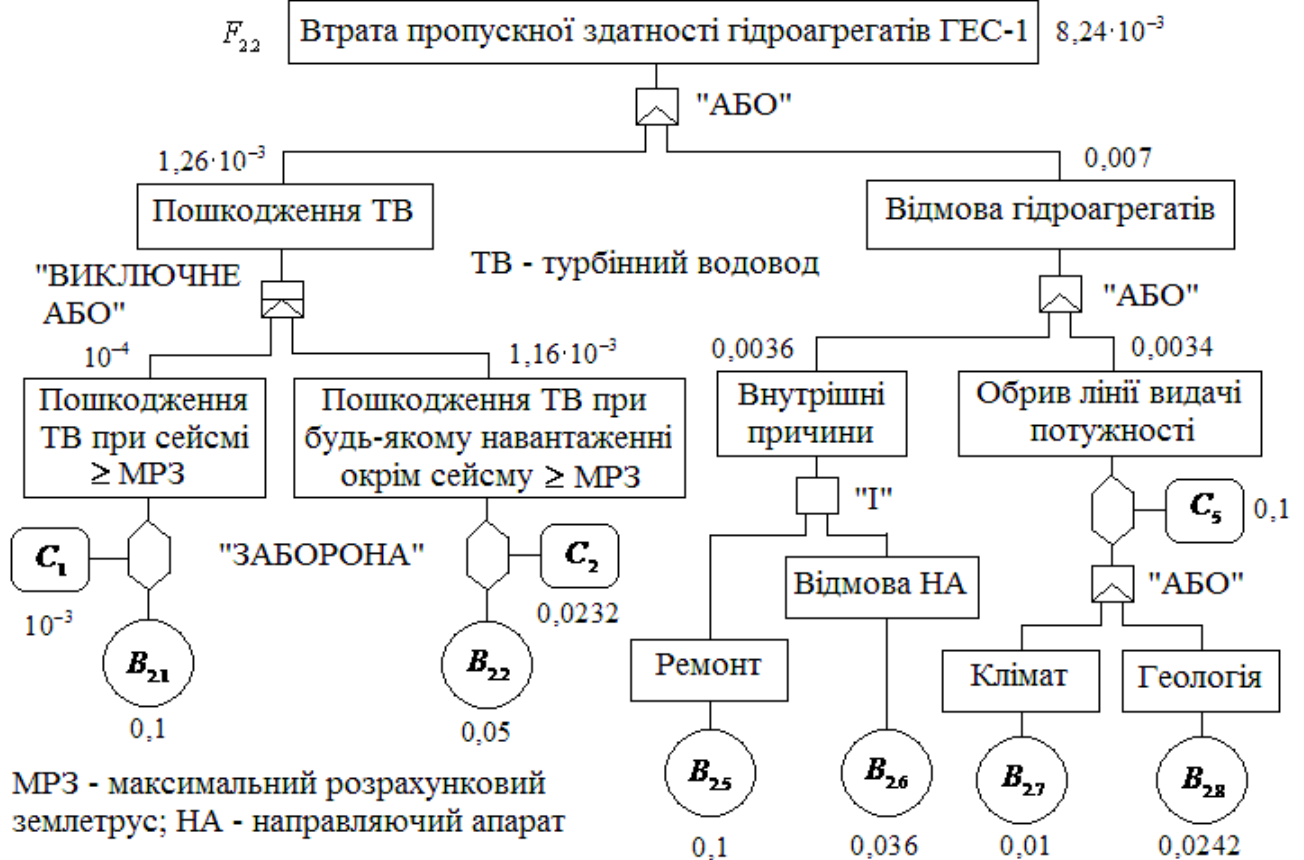
$$P(C_2, T_p) = 1 - P(C_1, T_p) = 1 - 0,0952 = 0,9048. \quad (2.19)$$

Звідки щорічна ймовірність події-умови C_2 , що доповнює умову C_1 :

$$P(C_2) = 1 - [1 - P(C_2, T_p)]^{1/T_p} = 1 - (1 - 0,9048)^{(1/100)} = 0,0232, \text{ рік}^{-1}. \quad (2.20)$$

Рис. 2.2. Моделювання аварійної події F_2

Рис. 2.3. Моделювання аварійної події F_3

Рис. 2.4. Моделювання аварійної події $F_{2,1}$ Рис. 2.5. Моделювання аварійної події $F_{2,2}$

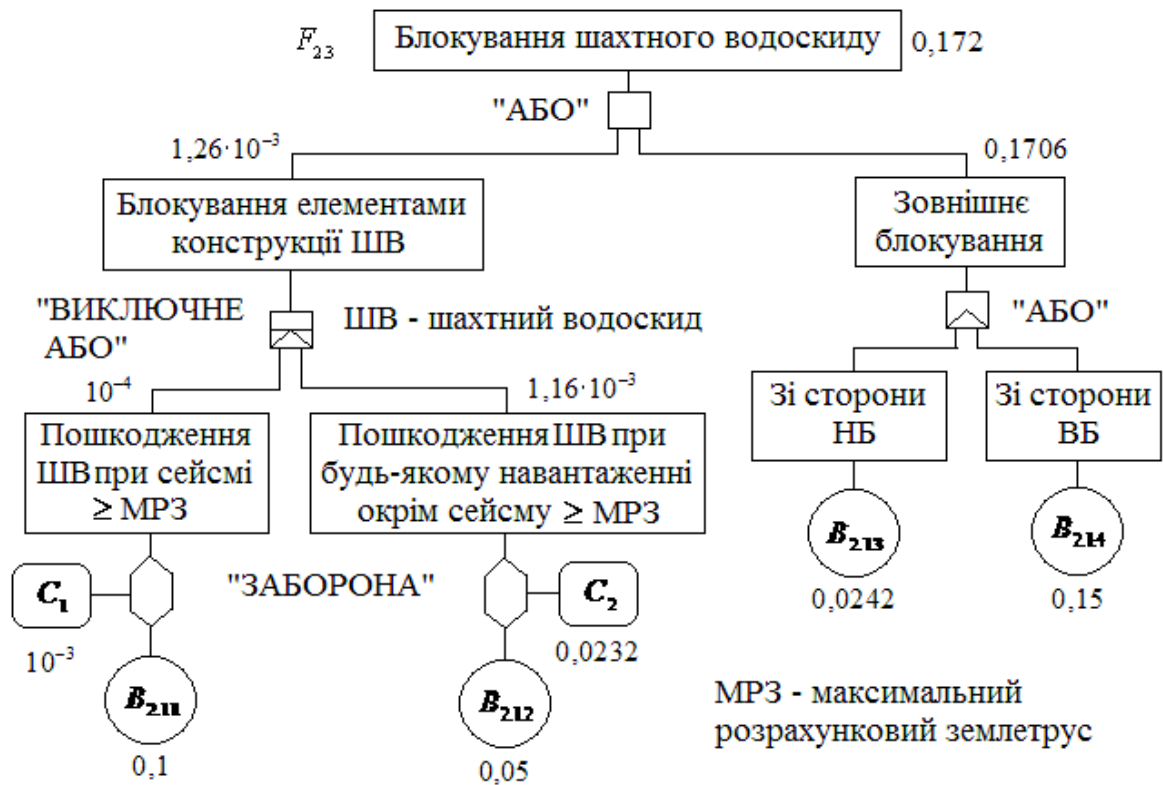


Рис. 2.6. Моделювання аварійної події $F_{2.3}$

Було отримано наступні ймовірності аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1:

при руйнуванні (вивалі) секції бетонної конструкції огороження БДР ймовірність $P(F_1) = 1,51 \cdot 10^{-5}$, рік⁻¹;

внаслідок неконтрольованого переливу води через гребінь бетонної конструкції огороження БДР ймовірність $P(F_2) = 2,62 \cdot 10^{-5}$, рік⁻¹;

в результаті аварійного виливу води через шахтний водоскид ймовірність $P(F_3) = 1,26 \cdot 10^{-4}$, рік⁻¹.

Повна ймовірність аварійного виливу води $P(A) = 1,67 \cdot 10^{-4}$, рік⁻¹.

2.3.2. Оцінка сумарного ризику збитків від аварійного виливу води

З метою оцінки сумарного (повного) ризику збитків від аварійного виливу води з БДР Зарамагської ГЕС-1 було здійснено оцінку ймовірностей реаліза-

ції відповідних модельних сценаріїв аварійного виливу води згідно з формулою 2.17. Результати оцінки ймовірностей реалізації відповідних модельних сценаріїв A_1 , A_2 , A_3 та розрахунків сумарного ризику збитків від аварійного виливу води з БДР Зарамагської ГЕС-1 за цими сценаріями зведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати розрахунків сумарного ризику збитків від аварійного виливу води з БДР Зарамагської ГЕС-1 (W – вартість будівництва ГЕС)

Характеристики	Аварійні події, F_i			Σ
	F_1	F_2	F_3	
$P(F_i)$, рік ⁻¹	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$1,673 \cdot 10^{-4}$
Збитки D_i , в долях від W	0,95	0,53	0,02	1,5
$P(A A_i)$	0,090	0,157	0,753	1
$P(A A_i) \cdot P(F_i)$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$9,49 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
$P(A_i)$, рік ⁻¹	$2,27 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$
Ризики збитків, в долях від W , рік ⁻¹	$2,16 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$3,16 \cdot 10^{-6}$	$8,92 \cdot 10^{-6}$

В результаті оцінки повного (сумарного) ризику збитків від аварійного виливу води з БДР Зарамагської ГЕС-1 було встановлено:

1) сумарний щорічний ризик збитків від аварійного виливу води з БДР Зарамагської ГЕС-1 з врахуванням трьох модельних сценаріїв оцінюється величиною $8,92 \cdot 10^{-6} \cdot W$, рік⁻¹, де W – вартість будівництва ГЕС;

2) дещо більшим «внеском» в сумарний ризик збитків, в порівнянні з іншими модельними сценаріями, характеризується сценарій A_2 – неконтрольований перелив води через гребінь бетонної конструкції огороження БДР в сторону р. Ардон, що слід приймати до уваги при розробці заходів щодо підвищення безпеки гідроспоруд Зарамагської ГЕС-1.

2.4. Задача імовірнісного прогнозування видатного затору в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла при заповненні водосховища на основі історичних даних в рамках байєсівського підходу

Заповнення водосховища Богучанського гідровузла, що розташований в Красноярському краї Російської Федерації, планувалося проводити у весняний період, коли на р. Ангара існує найбільша небезпека утворення заторів. Такий режим заповнення водосховища обумовлювався необхідністю закінчення заповнення водосховища до відкриття навігаційного сезону на р. Ангари [26, 145].

З метою заповнення водосховища передбачалося зниження витрати попуску через гідровузол з $3100 \text{ м}^3/\text{с}$ до санітарного попуску води в розмірі $1100 \text{ м}^3/\text{с}$. При такому різкому зниженні витрат води в період з березня по квітень на р. Ангара зростала небезпека утворення заторів із затопленням прилеглих прирічкових територій та населених пунктів [145].

Несприятливі наслідки утворення заторів прогнозувалися як для холодного року із суворою зимою і середнього року із середньою за суворістю зимою, так і для теплого року з теплою зимою, обраних в якості модельних років за кліматичними умовами. Критерієм для оцінювання року за кліматичними умовами використовувалася середньорічна температура повітря в регіоні. Для холодного року із суворою зимою середньорічна температура повітря приймалася рівною $-5,7^0 \text{ C}$ з імовірністю перевищення $\sim 2\%$; для середнього року із середньою за суворістю зимою рівною $-3,6^0 \text{ C}$, імовірністю перевищення $\sim 16\%$; для теплого року з теплою зимою рівною $+0,1^0 \text{ C}$ імовірністю перевищення $\sim 97\%$.

При оцінці ризику утворення видатних (особливо великих) заторів в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла при заповненні водосховища у весняний період використовувалися натурні дані про утворення заторів на ділянці ріки вниз за течією від створу гідровузла у період з 1974 р. по 2006 р. у найнебезпечніших створах та експертні висновки про можливе підтоплення. Натурні дані

були представлено Єнісейським басейновим водним управлінням (БВУ) Федерального агентства водних ресурсів Росії [145].

В якості модельного року для прогнозування видатних заторів при заповненні водосховища був обраний середній рік за середньою за суворістю зимою. Такий рік є найбільш небезпечним щодо частоти утворення заторів на Ангари в природних умовах. Крім того, кліматичні умови в регіоні, як показують метеорологічні спостереження, найчастіше відповідають умовам саме середнього року. Підтверджується це й негативною асиметрією розподілу середньорічних температур, що відповідають різним модельним рокам – холодному, середньому, тепловому. Негативною асиметрією характеризуються й розрахункові значення товщини льоду для холодного, середнього і теплого модельних років.

З цих припущень були встановлені наступні значення ймовірностей настання кліматичних умов, які відповідають умовам вибраних модельних років:

для холодного року з суровою зимою Y_1 – за щорічною імовірністю перевищення середньорічної температури відповідного року, імовірність реалізації відповідних кліматичних умов $P(Y_1) = 0,02, \text{ рік}^{-1}$;

для теплого року з теплою зимою Y_3 – за щорічною імовірністю перевищення середньорічної температури відповідного року, імовірність реалізації відповідних кліматичних умов $P(Y_3) = 0,03, \text{ рік}^{-1}$;

для середнього року Y_2 – як доповнення суми ймовірностей кліматичних умов, якими характеризуються холодний і теплий роки, до одиниці, імовірність реалізації відповідних кліматичних умов $P(Y_2) = 0,95, \text{ рік}^{-1}$.

Висновки про можливість підтоплення в результаті заторних явищ було зроблено для 25 населених пунктів, що розташовані у нижньому б'єфі гідровузла [145]. Для холодного року із суровою зимою було представлено 15 позитивних висновків про можливість підтоплення в результаті заторів з 25 можливих випадків. Для середнього року із середньою за суворістю зимою було представлено 25 позитивних висновків про можливість підтоплення в результаті заторів з 25 можливих випадків. Для теплого року з теплою зимою було представлено 7

позитивних висновків про можливість підтоплення в результаті заторів з 25 можливих випадків. Інші дані для оцінки ймовірності можливого підтоплення населених пунктів у результаті заторів у нижньому б'єфі Богучанського гідровузла в умовах зниження витрат води були відсутні.

За цих даних умовні ймовірності підтоплення населених пунктів у нижньому б'єфі Богучанського гідровузла у результаті заторних явищ залежно від модельного року розраховувались за формулою статистичної ймовірності у вигляді співвідношення очікуваної кількості випадків підтоплень населених пунктів внаслідок утворення заторів ($m_1 = 15$, $m_2 = 25$, $m_3 = 7$) до загальної кількості населених пунктів $N = 25$:

$$P(m | Y_i) = \frac{m_i}{N}, \quad (2.21)$$

де $i = \overline{1,3}$ – індекси модельних років (результати розрахунків в табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Ймовірності підтоплення населених пунктів у нижньому б'єфі Богучанського гідровузла ГЕС у результаті заторів залежно від модельного року [145]

Характеристика	Холодний рік Y_1	Середній рік Y_2	Теплий рік Y_3
Кількість населених пунктів, де очікується підтоплення, m	15	25	7
Умовна ймовірність підтоплення, $P(m Y_i)$	0,6	1	0,28

Повна ймовірність підтоплення з врахуванням можливості утворення небезпечних заторів в будь-якому з модельних років визначалася за формулою повної ймовірності (табл. 2.4):

$$P(F) = \sum_i P(Y_i) \cdot P(m | Y_i). \quad (2.22)$$

Таблиця 2.4

Безумовні ймовірності й повна ймовірність підтоплення населених пунктів у нижньому б'єфі Богучанського гідровузла у результаті заторів [145]

Характеристика	Холодний рік Y_1	Середній рік Y_2	Теплий рік Y_3
Розрахункова ймовірність появи модельного року, $P(Y_i)$, рік ⁻¹	0,02	0,95	0,03
Умовна ймовірність підтоплення, $P(m Y_i)$	0,6	1	0,28
Безумовна ймовірність підтоплення, рік ⁻¹	0,012	0,95	0,0084
Повна ймовірність підтоплення, $P(F)$, рік ⁻¹	0,9704		

Можна припустити, що ймовірність $P(F) = 0,9704$ являє собою верхню (sup) граничну оцінку ймовірності підтоплення одного (будь-якого) з 25 населених пунктів, що розташовані в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла, з врахуванням можливості реалізації модельних кліматичних умов, якими характеризуються три модельні роки, на момент весняного заповнення водосховища.

На основі аналізу природних умов на різних ділянках течії р. Ангари в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла було відібрано 21 створ можливого утворення небезпечних заторів (табл. 2.5). Серед них було виділено чотири створи, де спостерігалось не менш трьох великих (видатних) заторів (лист Єнісейського БВУ від 11.08.2011, № 05-2174): 1) 121 км від створу гідровузла, с. Богучани; 2) 231 км від створу гідровузла, с. Кам'янка; 3) 341 км від створу гідровузла, с. Рибне; 4) 409 км від створу гідровузла, с. Татарка.

Таблиця 2.5

Дані про утворення заторів в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла

Номер створу	Поселення	Відстань від ГЕС	Роки утворення заторів	Кількість заторів	$\hat{P}(S_j C)$
1		24 км	3 1974 р. по 2006 р.	Не більше 2 за 33 роки	0,06061
2		38 км			
3		54 км			
4		64 км			
5		69 км			
6		81 км			
7		103 км			
8	Богучани	121 км	1974, 1977, 1985-1989, 1992, 1995, 1997, 1999, 2000, 2002, 2006	14 за 33 роки	0,42424
9		148 км	3 1974 р. по 2006 р.	Не більше 2 за 33 роки	0,06061
10		164 км			
11		193 км			
12		212 км			
13	Кам'янка	231 км	1983, 1988, 1989, 1992, 1996, 1998, 2001, 2002, 2004, 2005, 2006	11 за 33 роки	0,33333
14		262 км	3 1974 р. по 2006 р.	Не більше 2 за 33 роки	0,06061
15		271 км			
16		286 км			
17		319 км			
18	Рибне	341 км	1975, 1989, 1991, 1992, 1997, 2001	6 за 33 роки	0,18182
19		367 км	3 1974 р. по 2006 р.	Не більше 2 за 33 роки	0,06061
20		387 км			
21	Татарка	409 км	1988, 1995, 1997	3 за 33 роки	0,09091

При m_j випадках утворення заторів за період спостережень n років апріорна умовна ймовірність утворення затору в j -му створі за умов C :

$$\hat{P}(S_j | C) = \frac{m_j}{n}, \quad (2.23)$$

де умови C являють собою деякі «осереднені» умови формування заторів в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла до початку заповнення водосховища.

З врахуванням ймовірності $P(C)$ реалізації умов C апріорна повна (безумовна) ймовірність утворення затору $\hat{P}(S_j)$ в j -му створі буде:

$$\hat{P}(S_j) = P(C) \cdot \hat{P}(S_j | C), \quad (2.24)$$

де ймовірність «осереднених» умов формування заторів до початку заповнення водосховища приймемо рівною розрахунковій ймовірності реалізації середнього року із середньою по суворості зимою: $P(C) = P(Y_2) = 0,95, \text{ рік}^{-1}$.

Результати розрахунків ймовірностей $\hat{P}(S_j)$ наведено нижче в табл. 2.6.

Аналіз натурних даних про утворення заторів у небезпечних створах (табл. 2.5) показує, що в 1988, 1989, 1992, 1995, 1997, 2001, 2002, 2006 рр. великі затори спостерігались одночасно в декількох небезпечних створах (не менше ніж у двох). В 1988, 1989, 1992, 1997 рр. великі затори спостерігалися не менше ніж у трьох найнебезпечніших створах. В 25 випадках з 33 великі затори спостерігалися тільки в одному з виділених створів. З запасом ризику можна прийняти, що події, пов'язані з утворенням великих заторів у різних створах, являють собою стохастично незалежні й сумісні (оскільки спостерігалися в різних створах одночасно) події. Тоді, згідно з формулою ймовірності об'єднання незалежних сумісних подій [29, 109], повна ймовірність утворення затору в будь-якому зі створів у нижньому б'єфі Богучарського гідровузла до початку заповнення водосховища буде:

$$\hat{P}(S) = 1 - \prod_{j=1}^{21} (1 - \hat{P}(S_j)). \quad (2.25)$$

Підставивши значення ймовірностей $\hat{P}(S_j)$, маємо: $\hat{P}(S) = 0,8875, \text{ рік}^{-1}$.

Таблиця 2.6

Ймовірності утворення заторів в нижньому б'єфі Богучанської ГЕС до початку заповнення водосховища

Номер створу	Населений пункт	Відстань від створу гідровузла	$P(C)$	$\hat{P}(S_j C)$	$\hat{P}(S_j), \text{ рік}^{-1}$
1		24 км	0,95	0,06061	0,0575795
2		38 км			
3		54 км			
4		64 км			
5		69 км			
6		81 км			
7		103 км			
8	Богучани	121 км		0,42424	0,403028
9		148 км		0,06061	0,0575795
10		164 км			
11		193 км			
12		212 км			
13	Кам'янка	231 км			
14		262 км		0,06061	0,0575795
15		271 км			
16		286 км			
17		319 км			
18	Рибне	341 км		0,18182	0,172729
19		367 км		0,06061	0,0575795
20		387 км			
21	Татарка	409 км		0,09091	0,0863645

Особливо великі (видатні) затори на досліджуваній ділянці в природних умовах, що сталися в 1988 р. (Кам'янка, Татарка), 1999 р. (Богучани), 2001 р. (Рибне), виникали в одиничних випадках. Можна припустити, що чим крупнішим очікується затор в одному зі створів, тим менше ймовірність виникнення видатного затору в іншому створі. Отже, видатні, екстраординарні затори в різних створах можна розглядати як несумісні події.

За відомої повної ймовірності утворення затору в будь-якому зі створів, ймовірність утворення видатного затору в окремому j -му створі згідно з формулою повної ймовірності [29, 109] буде:

$$P(S_j) = P(S) \cdot P(S_j | S), \quad (2.26)$$

де $P(S)$ – повна ймовірність утворення затору в будь-якому зі створів; $P(S_j)$ – безумовна ймовірність утворення видатного затору в j -му створі (на відміну від апіорної ймовірності утворення затору $\hat{P}(S_j)$ в цьому створі, характеризує можливість унікального явища, несумісного з подібним унікальним явищем в іншому створі); $P(S_j | S)$ – ймовірність утворення видатного затору в j -му створі за умови, що затор відбувся в одному (будь-якому) з можливих створів.

Ймовірність $P(S_j | S)$ є байєсівською ймовірністю [29, 109], яка в нашому випадку згідно з формулою Байєса буде:

$$P(S_j | S) = \frac{P(S | S_j) \cdot \hat{P}(S_j)}{\sum_j \hat{P}(S | S_j) \cdot \hat{P}(S_j)}, \quad j = \overline{1, 21}, \quad (2.27)$$

де $P(S | S_j)$ – умовна ймовірність утворення затору в j -му створі, яку оцінюємо як «вагу» ймовірності $\hat{P}(S_j)$ утворення затору в j -му створі серед ймовірностей утворення заторів в інших створах [117, 221]:

Таблиця 2.7

Імовірності утворення заторів у нижньому б'єфі Богучанського гідровузла в природних умовах (до початку заповнення водосховища)

Но- мер ство- ру	Посе- лення	Відс- тань від ГЕС	$\hat{P}(S_j)$	$\hat{P}(S S_j)$	$\frac{\hat{P}(S_j) \cdot \hat{P}(S S_j)}{\hat{P}(S)}$	$P(S_j S)$	$P(S_j)$
1		24 км	0,05758	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
2		38 км					
3		54 км					
4		64 км					
5		69 км					
6		81 км					
7		103 км					
8	Богучани	121 км	0,403028	0,20587	0,08297	0,4558	0,40452
9		148 км	0,05758	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
10		164 км					
11		193 км					
12		212 км					
13	Кам'янка	231 км	0,316664	0,16176	0,05122	0,28139	0,24973
14		262 км	0,05758	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
15		271 км					
16		286 км					
17		319 км					
18	Рибне	341 км	0,172729	0,08823	0,01524	0,08372	0,0743
19		367 км	0,05758	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
20		387 км					
21	Татарка	409 км	0,086365	0,04412	0,00381	0,02093	0,01858
Перевірка $\sum_{j=1}^{21} =$				1		1	0,8875

$$P(S | S_j) = \frac{\hat{P}(S_j)}{\sum_j \hat{P}(S_j)}. \quad (2.28)$$

Результати розрахунку ймовірностей утворення видатних заторів у нижньому б'єфі Богучанського гідровузла в природних умовах (до початку заповнення водосховища) зведено в табл. 2.7.

Аналіз ймовірностей виникнення заторів, які наведено у табл. 2.7, показує, що утворення видатного затору до початку заповнення водосховища Богучанського гідровузла (в природних умовах) є найбільш ймовірним в створі, який розташовується на відстані 121 км від створу ГЕС біля селища Богучани.

Ймовірність утворення видатного затору біля с. Богучани в природних умовах виявилася навіть більшою за ймовірність утворення звичайного затору в цьому створі. Що стосується інших потенційно небезпечних створів, то ймовірності утворення видатних заторів у них, у порівнянні з ймовірностями утворення звичайних заторів, виявилися істотно меншими.

Ймовірнісний прогноз утворення видатних заторів у кожному з виділених створів при заповненні Богучанського водосховища здійснювався з врахуванням верхньої (sup) граничної оцінки ймовірності утворення затору в будь-якому (хоча б одному) з цих створів $P(F) = 0,9704$.

Результати розрахунку ймовірностей утворення видатних заторів у різних створах до заповнення (в природних умовах) й при заповненні водосховища представлені в табл. 2.8. Розрахунки показали, що при заповненні водосховища Богучанського гідровузла у весняний період, у березні-квітні, при витратах у нижньому б'єфі, що не перевищують $1100 \text{ м}^3/\text{с}$, очікується збільшення ймовірностей виникнення видатних заторів в кожному з виділених потенційно небезпечних створів. При цьому таке збільшення в порівнянні з умовами до заповнення водосховища може скласти $\sim 9\%$, а ймовірність виникнення видатного затору в створі біля с. Богучани може досягти $0,44231, \text{ рік}^{-1}$.

Таблиця 2.8

Ймовірності утворення видатних заторів у нижньому б'єфі Богучанського гідровузла до початку заповнення водосховища та при його заповненні

Номер створу	Населений пункт	Відстань від гідровузла	Ймовірність видатного затору, $P(S_i)$	
			До заповнення водосховища	При заповненні водосховища
1		24 км	0,00826	0,00903
2		38 км		
3		54 км		
4		64 км		
5		69 км		
6		81 км		
7		103 км		
8	Богучани	121 км	0,40452	0,44231
9		148 км	0,00826	0,00903
10		164 км		
11		193 км		
12		212 км		
13	Кам'янка	231 км	0,24973	0,27306
14		262 км	0,00826	0,00903
15		271 км		
16		286 км		
17		319 км		
18	Рибне	341 км	0,0743	0,08124
19		367 км	0,00826	0,00903
20		387 км		
21	Татарка	409 км	0,01858	0,02031
Перевірка $\sum_{j=1}^{21} =$			0,8875	0,9704

2.5. Деякі узагальнення байєсівського підходу до оцінки ризику аварій на гідровузлах

2.5.1. Використання байєсівських мереж

Одним з напрямів подальшого розвитку імовірнісного моделювання розвитку аварій на гідровузлах з метою уточнення оцінок ймовірностей різних подій-наслідків в рамках байєсівського підходу може стати використання байєсівських мереж (БМ) [19, 20, 22, 45, 46, 51, 60, 170, 174, 205, 206, 214].

Байєсівські мережі (БМ) – це математичний апарат, який дозволяє поєднати досить просте графічне зображення аварійного процесу з його імовірнісним характером, проаналізувати можливі варіанти розвитку аварійної ситуації, відстежити правильність встановлення причинно-наслідкового зв'язку між окремими аварійними подіями і завдяки цьому підвищити обґрунтованість рішень при аналізі складних проблемних ситуацій [19, 20, 22].

Формально, БМ – це трійка $N = V, G, J$, першою компонентою якої є множина змінних V ; другою – орієнтований ациклічний граф G , вузли якого відповідають дискретним випадковим змінним зі скінченим числом станів відповідного аварійного процесу, що моделюється, а ребра є причинними зв'язками між ними, які характеризуються таблицею ймовірностей переходів з одного стану до іншого під впливом збурень; J – спільний розподіл ймовірностей змінних $V = \{X_i\}$, $i = \overline{1, n}$. Для байєсівської мережі властиво наступне:

- виконується умова Маркова: кожна змінна мережі не залежить від усіх інших змінних, за винятком батьківських попередників цієї змінної;
- кожна вершина може приймати одне значення із скінченої множини взаємовиключних станів (несумісних подій);
- кожній вершині із змінними-батьками ставиться у відповідність таблиця умовних ймовірностей; якщо вершини не мають батьків, то використовуються безумовні ймовірності.

Таким чином, байєсівська мережа – це деяка модель зображення імовірнісних залежностей (взаємозв'язків) між вершинами графа, в якому встановлюються причинно-наслідкові зв'язки між подіями.

При побудові байєсівських мереж можливі випадки, коли попередня структура мережі задається емпірично (її отримують від експертів або з інших моделей, за допомогою інших методів чи алгоритмів). Якщо структура БМ невідома, то її вибудовують. В обох випадках при наявності статистичної інформації часто використовується евристичний алгоритм побудови БМ, подібний тому, що практикується в логіко-імовірнісних методах дерев подій і дерев відмов і несправностей. В першому випадку за допомогою евристичного алгоритму може додатково коригуватися структура мережі, а у другому – здійснюється її початкова побудова. В подальшому структура БМ може модифікуватися на основі знань експертів щодо причинно-наслідкових зв'язків того чи іншого аварійного процесу або з новими даними.

Побудова типової БМ здійснюється за наступним алгоритмом [19, 20]:

- 1) формалізується постановка задачі імовірнісного прогнозу;
- 2) визначається множина даних, що відносяться до змінних задачі, встановлюються експертні оцінки і/або статистичні дані;
- 3) визначаються взаємовиключні змінні для всіх встановлених даних;
- 4) будується ациклічний граф, що відображає істотні умови незалежності змінних та існування причинно-наслідкових зв'язків;
- 5) визначаються апіорні ймовірності та оптимізується топологія мережі на основі наявної інформації;
- 6) виконується навчання мережі і формулюється висновок щодо відповідних станів аварійного процесу;
- 7) здійснюється обробка та аналіз отриманих результатів, та встановлюється ймовірність аварійної події, що досліджується.

Головною цінністю байєсівських мереж є їх здатність виявляти невідомі та нетривіальні зв'язки між факторами, про які експерти можуть не здогадуватися [19, 20]. Застосування БМ до аналізу процесів різної природи, діяльності

людини та функціонування технічних систем дозволяє враховувати та використовувати будь-які вхідні дані: експертні оцінки, статистичну інформацію тощо. При цьому, завдяки використанню представлення взаємодії між факторами аварійного процесу у вигляді причинно-наслідкових зв'язків у БМ досягається максимально високий рівень візуалізації та чітке розуміння суті взаємодії факторів процесу між собою. Іншими перевагами БМ є можливості врахування невизначеностей статистичного, структурного і параметричного характеру, а також формування висновку за допомогою різних методів – наближених і точних.

2.5.2. Оцінка ймовірностей аварійних подій виду $(A | A_i)$ та формування повних груп серед подій-умов, що обумовлюють перебіг аварій

Аварійні події виду $(A | A_i)$, $i = \overline{1, n}$, – це складні (наслідкові, вторинні) аварійні події, які, загалом є більш невизначеними, ніж відповідні їм «входи» $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, і які пов'язуються з формами та видами аварій на гідропорудах тощо. Ймовірності «виходів» $(A | A_i)$, $i = \overline{1, n}$, в загальній постановці задачі можуть бути отримані лише розрахунковими методами, наприклад, як ймовірності реалізації деяких подій-припущень (порушення встановлених на експертному рівні критеріїв міцності, стійкості гідропоруд в аварійних ситуаціях тощо), які, в свою чергу, досить часто є сумісними подіями [28].

Окрім прямого «зважування» таких подій за ймовірністю у вигляді (2.9) найпростіша (лінійна) 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:

$$P(F_i) = \frac{2(n - i + 1)}{(n + 1) \cdot n}, \quad (2.29)$$

де $P(F_i)$ – «вага» упорядкованої згідно з її рангом у порядку убудування значимості аварійної події $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$.

У всіх випадках, коли ймовірності $P(F_i)$ відповідних форм (видів тощо) аварій встановлюються аналітичними або логіко-ймовірнісними методами оцінка ймовірностей $P(A | A_i)$ здійснюється за формулою (2.9) – прямим «зважуванням». Правило Фішберна (2.29) може застосовуватися у випадках, коли ймовірності $P(F_i)$ визначаються експертним шляхом.

Формування повних груп подій (нормування) серед подій-умов, що обумовлюють перебіг аварійних процесів на гідроспорудах, при врахуванні більше ніж двох таких подій однієї й тієї ж природи, якщо такі події-умови характеризуються різними ймовірностями перевищення розрахункових характеристик, може здійснюватися наступними трьома способами [133].

Згідно з першим способом приймається, що ймовірності перевищення розрахункових характеристик подій-умов визначаються з однаковою точністю, яка не викликає сумнівів в їх достовірності.

Згідно з другим способом враховується статистична достовірність прийнятої гіпотези, наприклад, щодо закону розподілу, за яким визначаються ймовірності перевищення розрахункових характеристик подій-умов. Припустімо, що ця достовірність, позначимо її $\nu(\chi^2)$, встановлюється за результатами перевірки гіпотез за критерієм χ^2 К. Пірсона.

Згідно з третім способом кожній з подій-умов приписується певна «вага» в системі подій, і при нормуванні ймовірність перевищення кожної події має оцінюватися з врахуванням деякого «вагового» коефіцієнта γ_w .

Введення коефіцієнта γ_w може пояснюватися, наприклад, тим, що, по-перше, з менш ймовірними подіями, в порівнянні з більш ймовірними подіями, може пов'язуватися більша небезпека, по-друге, характеристики менш ймовірних, екстремальних, подій можуть оцінюватися з більшою похибкою.

Нехай має місце J довільних подій C_j , $j = \overline{1, J}$, які мають нормуватися (включатися в повну групу аварійних подій-умов).

Виконаємо ранжирування та нумерацію подій за правилом:

$$P(C_1) < P(C_2) < \dots < P(C_j) < \dots < P(C_{j-1}) < P(C_j), \quad (2.30)$$

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

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

$$\begin{aligned} P_i(C_1) &= P(C_1); \quad P_i(C_2) = P(C_2) - P(C_1); \quad \dots \\ \dots; \quad P_i(C_j) &= P(C_j) - P(C_{j-1}); \quad \dots; \quad P_i(C_j) = P(C_j) - P(C_{j-1}). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Згідно з другим та третім способами нормування здійснюється за формулою:

$$P_i(C_j) = \frac{\mu \cdot P^*(C_j)}{\sum_{j=1}^J P^*(C_j)}, \quad (2.32)$$

де ймовірності $P^*(C_j)$:

$$P^*(C_j) = (P(C_j) - P(C_{j-1})) \cdot (2 - \nu(\chi^2)), \quad (2.33)$$

$$P^*(C_j) = P(C_j) \cdot \gamma_{w,j} - P(C_{j-1}) \cdot \gamma_{w,j-1}, \quad (2.34)$$

$P(C_j)$, $P(C_{j-1})$ – ймовірності перевищення j -ї та $j-1$ -ї подій-умов, ймовірності 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, коли $\sum_{j=1}^J P^*(C_j) \leq 1$ (або $\leq 100\%$) приймається рівною $\sum_{j=1}^J P^*(C_j)$,

якщо $\sum_{j=1}^J P^*(C_j) > 1$ (або більше 100%), то приймається рівною одиниці або 100

%; $\nu(\chi^2)$ – статистична достовірність закону розподілу, за яким визначаються ймовірності перевищення розрахункових характеристик подій-умов, і яка встановлюється за результатами перевірки гіпотез згідно з критерієм χ^2 К. Пірсона; $\gamma_{w,j}$ – «ваговий» коефіцієнт, який для ранжированих згідно з правилом (2.30) подій може визначатися за формулою:

$$\gamma_{w,j} = 1 + \lg \left(\frac{P(C_{j+1})}{P(C_j)} \right), \quad j = \overline{1, J}. \quad (2.35)$$

При цьому більш ймовірним подіям-умовам в повній групі подій надаватиметься нелінійно зростаюча «вага» (більший пріоритет).

2.6. Висновки до розділу 2

1. Сформульовано основні узагальнення – означення і твердження, що стосуються оцінки ризиків аварій, та здійснено загальну постановку задачі кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах в рамках байєсівського підходу.

2. Прийнято, що аварія на гідровузлі може виникнути з будь-якої з довільних аварійних подій-причин, може відбутися в різних формах або видах, але розвиватиметься лише за одним зі встановлених у вигляді ідеалізованих подій-припущень сценаріїв. При цьому повний (сумарний) ризик збитків від аварії має встановлюватися з врахуванням різних несумісних сценаріїв її реалізації, а повна ймовірність аварії – з врахуванням всіх довільних аварійних подій-причин, в тому числі і сумісних.

3. Показано, що ймовірність $P(A_i)$ реалізації кожного окремого модельного сценарію A_i аварії A на гідровузлі визначається за правилом добутку ймовірностей: повної ймовірності виникнення аварії $P(A)$ та умовної ймовірності аварії за відповідним сценарієм $P(A_i | A)$, де умовна ймовірність аварії $P(A_i | A)$

за відповідним сценарієм A_i є байєсівською ймовірністю, яка визначається згідно з формулою Байєса.

4. В якості прикладу оцінки ризику збитків від аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 розглянуто практичну задачу кількісної оцінки сумарного ризику збитків від аварії на гідровузлі з врахуванням кількох модельних сценаріїв, з якими пов'язуються різні збитки. При чисельних розрахунках повної ймовірності аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1, окремих видів і форм реалізації аварії використано логіко-імовірнісний метод дерев відмов і несправностей. Оцінку ймовірностей модельних сценаріїв аварії як несумісних подій здійснено на основі байєсівського перетворення ймовірностей відповідних цим сценаріям видів аварії як сумісних аварійних подій.

5. В якості прикладу оцінки ризику аварії як ймовірності відповідної аварійної події в рамках байєсівського підходу розглянуто практичну задачу імовірнісного прогнозування можливості видатного затору в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла при заповненні водосховища на основі історичних даних. Показано, що метод Байєса дозволяє здійснювати переоцінку ймовірностей аварійних подій в залежності від зміни ситуації та нових даних.

6. Виконано узагальнення методу Байєса до оцінки ризиків аварій на гідровузлах, зокрема, розглянуто можливість використання при імовірнісному прогнозуванні аварій на гідропорудах байєсівських мереж, та наведено способи нормування ймовірностей (приведення до повних груп подій) подій-умов, які можуть обумовлювати виникнення аварій на гідропорудах.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [117, 128, 132, 133, 145, 149, 150, 167, 221, 223, 230].

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТЕЙ СИСТЕМНИХ АВАРІЙ НА ГІДРОВУЗЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ БАЙЄСА

В останній час, на гідровузлах, в зв'язку з впровадженням автоматизованих систем контролю та управління виробничими процесами, експлуатацією унікального устаткування і обладнання, роботою гідроспоруд в каскадах гідровузлів тощо виникли передумови для виникнення системних аварій, що можуть розвиватися й за нетиповими, малоймовірними в минулому, сценаріями.

Серед таких системних аварій на гідровузлах, що сталися за останнє десятиліття, виділяються дві аварії, перебіг яких супроводжувався відмовами автоматичних засобів регулювання, оснащених сучасною комп'ютерною технікою. Одна з них відбулася 14 грудня 2005 р. на ГАЕС Таум Саук (Міссурі, США). Було встановлено, що причиною руйнування дамби огороження верхового басейну ГАЕС було його переповнення та перелив води через гребінь дамби внаслідок збою в комп'ютерній програмі системи автоматичного регулювання рівня води в басейні [232, 233]. Інша аварія сталася 17 серпня 2009 року на Саяно-Шушенській ГЕС (Росія, Хакасія) в результаті руйнування гідроагрегату. Аварія розвинулася до катастрофічних масштабів внаслідок відмови автоматики, що не спрацювала в режимі перекриття напірних трактів аварійно-ремонтними затворами [62, 88, 203]. В обох випадках аварії носили нетиповий характер [119, 126, 126, 144, 222], із залученням в механізми виникнення й розвитку аварій автоматичних засобів забезпечення надійності й безпеки гідровузлів.

Розміщення на гідроспорудах складного механічного устаткування, можливість блокування донних та поверхневих водоскидів на водосховищах з малими об'ємами [210], в результаті чого зменшується пропускна здатність водопропускних споруд, що загрожує переповненням водосховища при пропуску паводків, які є меншими за розрахункові, й руйнуванням гідроспоруд [52], будівництво каскадів з кількох гідровузлів, коли аварія на розташованих вище за течією напірних гідроспорудах може загрозувати гідроспорудам гідровузла, що

розташовується нижче за течією [65, 161], все це зумовлює актуальність прогнозування сценаріїв системних аварій на гідровузлах. До таких сценаріїв аварій можуть відноситися будь-які сценарії, виникнення яких не суперечить фізичним законам природи, перебіг яких обумовлюється екстраординарними або малоймовірними подіями, екстремальними умовами або сполученнями декількох типових сценаріїв, що складаються сукупностями подій, значення ймовірності хоча б однієї з яких не може бути встановлено апріорі на основі відомих фактів, а лише у вигляді баєсівської ймовірності події-припущення.

3.1. Оцінка ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв

Загальну постановку задачі оцінки безвідмовності зарезервованої системи з автоматичним перемикачем на резерв вперше було наведено в [176]. Особливістю такої системи є залежність її безвідмовності не тільки від кількості і надійності резервних підсистем, що позитивно впливає на надійність системи, підвищуючи її, а й автоматичних перемикачів на резерв – пристроїв, що не є елементами резервування, і наявність яких в зарезервованій системі може понижувати її безвідмовність. Оскільки відмови автоматичних перемикачів на резерв є випадковими подіями, то можна припустити, що саме завдяки цим пристроям і встановлюються в подібних системах стохастичні зв'язки між відмовами підсистем, що резервуються, і резервними підсистемами.

Розглянемо систему $\mathbf{S}_{2,a}^r$, що складається з основної підсистеми (позначимо її s_1), підсистеми, що перебуває в «холодному» резерві (s_2), та автоматичного перемикача на резерв (позначимо його $a_{1,2}$): $\mathbf{S}_{2,a}^r = \{s_1, a_{1,2}, s_2\}$.

Нехай резервна підсистема s_2 вмикається в роботу автоматичним перемикачем $a_{1,2}$ у разі відмови основної підсистеми s_1 . Приймається, що після того як спрацювала резервна підсистема s_2 , відмова автоматичного перемикача на

резерв $a_{1,2}$ вже не зможе призвести до її відмови, і, відповідно, до відмови системи $S_{2,a}^r$ в цілому. Визначимо систему $S_{2,a}^r$ як зарезервовану систему з автоматичним перемиканням на резерв [160].

Прикладами такої системи можуть бути: система енергопостачання з основним та резервним живленням, насосна система з робочим та резервним насосними агрегатами тощо, перемикання на резервні агрегати в яких здійснюється автоматично, система автоматичного перекриття затвором напірного тракту аварійного гідроагрегата та ін.

Характерні відмови системи $S_{2,a}^r$ як події-припущення описано в [176]. Система $S_{2,a}^r$ відмовляє, якщо: 1) при працездатному автоматичному перемикачіві на резерв відмовили основна s_1 та резервна s_2 підсистеми (позначимо цю подію-відмову A_1), або 2) спочатку відмовив автоматичний перемикач на резерв $a_{1,2}$, а потім відмовила підсистема s_1 (нехай це буде подія-відмова A_2).

Проаналізуємо події-відмови A_1, A_2 .

Відмова A_1 . Якщо відмовляє основна підсистема s_1 , то при працездатному автоматичному перемикачіві на резерв $a_{1,2}$ відбувається автоматичне вмикання резервної підсистеми s_2 , що знаходиться в «холодному» резерві, і для того щоб відмовила система $S_{2,a}^r$ в цілому має відмовити і резерв. Тобто відмова A_1 реалізується за умови, що автоматичний перемикач на резерв безпосередньо при відмові підсистеми s_1 , що резервується, знаходиться в працездатному стані.

Відмова A_2 . Якщо автоматичний перемикач на резерв непрацездатний, то при відмові основної підсистеми вмикання резервної системи не відбувається і система $S_{2,a}^r$ відмовляє. Тобто відмова A_2 реалізується за умови, що автоматичний перемикач на резерв переходить в непрацездатний стан ще при працездатній підсистемі, що резервується.

За результатами аналізу системних відмов A_1, A_2 як подій-припущень можна зробити два висновки [160].

Перший висновок полягає в тому, що відмови A_1 , A_2 є несумісними подіями, оскільки автоматичний перемикач на резерв не може одночасно знаходитись як в працездатному, так і в непрацездатному станах.

Другий висновок полягає в тому, що система $S_{2,a}^r$ може функціонувати і при несправному перемикачеві на резерв, якщо при цьому основна система працездатна, а також при відмові основної системи при справному на момент спрацювання перемикача на резерв резервному пристрої.

Несумісність системних відмов A_1 і A_2 дає змогу при оцінці ймовірності відмови системи $S_{2,a}^r$ скористатись формулою повної ймовірності:

$$P(S_{2,a}^r) = P(A_1) + P(A_2), \quad (3.1)$$

де $P(A_1)$, $P(A_2)$ – ймовірності відмов A_1 і A_2 , відповідно.

Таким чином поставлена задача зводиться до оцінки ймовірностей реалізації системних відмов A_1 , A_2 як подій-припущень з врахуванням при визначенні ймовірності $P(A_1)$ умови, що автоматичний перемикач на резерв безпосередньо при відмові підсистеми, що резервується, знаходиться в працездатному стані (позначимо цю умову θ_1), а при визначенні ймовірності $P(A_2)$ – умови, що перемикач на резерв переходить в непрацездатний стан ще при працездатній підсистемі, що резервується (умова θ_2).

Умови θ_1 та θ_2 за визначенням формують повну групу подій. Оскільки сума ймовірностей умов θ_1 і θ_2 має дорівнювати одиниці, то для того щоб задати ймовірності реалізації цих умов достатньо визначити з якою ймовірністю відмовить пристрій $a_{1,2}$ до того, як відмовить підсистема s_1 .

Для оцінки ймовірності відмови пристрою $a_{1,2}$ до того, як відмовить підсистема s_1 , виділимо зі складу системи $S_{2,a}^r$ деяку умовну систему $S_{1,a}^r$, що формується підсистемою s_1 та автоматичним перемикачем на резерв $a_{1,2}$ (рис. 3.1).

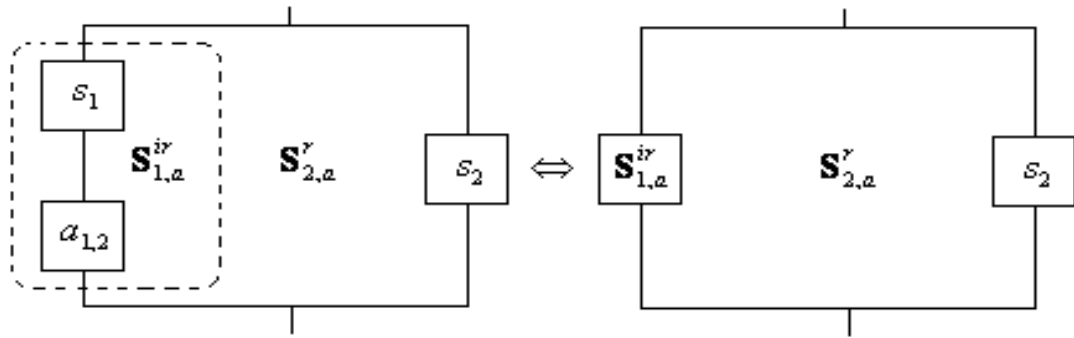


Рис. 3.1. Структурна модель надійності системи

$\mathbf{S}_{2,a}^r = \{s_1, a_{1,2}, s_2\}$ до першої відмови

Вважатимемо систему $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$ (індекс *ir* означає «без надмірності») працездатною, якщо працездатні як підсистема s_1 , так і автоматичний перемикач на резерв $a_{1,2}$, та непрацездатною, якщо відмовить підсистема s_1 або пристрій $a_{1,2}$. Покладемо також, що між відмовами підсистеми s_1 та автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ стохастичний зв'язок відсутній, тобто s_1 і $a_{1,2}$ відмовляють з власних, незалежних причин.

Тоді ймовірність відмови пристрою $a_{1,2}$ до того, як відмовить основна підсистема s_1 , може бути визначена як ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$ внаслідок виходу з ладу $a_{1,2}$.

Сформуємо повну групу подій, як і у випадку системних відмов A_1 і A_2 для системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$, для того щоб при оцінці ймовірності відмови системи $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$ скористатися формулою повної ймовірності:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}) = P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, s_1) + P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2}), \quad (3.2)$$

де

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, s_1) = P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | s_1) \cdot P(s_1), \quad (3.3)$$

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2}) = P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | a_{1,2}) \cdot P(a_{1,2}). \quad (3.4)$$

В формулах (3.2)÷(3.4) $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, s_1)$, $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2})$ – безумовні, $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | s_1)$, $P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | a_{1,2})$ – умовні (байєсівські) ймовірності відмови системи $\mathbf{S}_{1,a}^{ir}$ внаслідок відмов підсистеми s_1 і пристрою $a_{1,2}$, відповідно.

Оскільки, за визначенням, для відповідних подій-відмов справедливо, що

$$(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | s_1) \cup (\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | a_{1,2}) = \Omega, P(\Omega) = 1, (\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | s_1) \cap (\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | a_{1,2}) = \emptyset, \quad (3.5)$$

то з врахуванням означення 4 (§ 2.1) ймовірності

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | s_1) = \frac{P(s_1)}{P(s_1) + P(a_{1,2})}, P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir} | a_{1,2}) = \frac{P(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})}. \quad (3.6)$$

Звідки

$$P(\mathbf{S}_{1,a}^{ir}, a_{1,2}) = \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})}. \quad (3.7)$$

В результаті отримуємо значення ймовірностей реалізації умов θ_1, θ_2 :

$$P(\theta_2) = \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})}, \quad (3.8)$$

$$P(\theta_1) = 1 - \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})}. \quad (3.9)$$

Ймовірності системних відмов A_1 і A_2 (див. їх аналіз), відповідно, будуть:

$$P(A_1) = P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot \left[1 - \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})} \right], \quad (3.10)$$

$$P(A_2) = P(s_1) \cdot \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})}. \quad (3.11)$$

Звідки, з врахуванням (3.1), повна ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$ з автоматичним перемиканням на резерв буде:

$$P(\mathbf{S}_{2,a}^r) = P(s_1) \cdot \left[P(s_2) + \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})} (1 - P(s_2)) \right]. \quad (3.12)$$

Покажемо, що в залежності від співвідношення значень ймовірностей відмов підсистеми s_1 , що резервується, та резервної системи s_2 , ймовірність відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ може по різному впливати на ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$ в цілому. Нехай, для прикладу: $P(s_1) = 10^{-3}$, $P(s_2) = 2 \cdot 10^{-3}$, $P(a_{1,2}) = 3 \cdot 10^{-3}$. Маємо $P(\mathbf{S}_{2,a}^r) = 5 \cdot 10^{-6}$. При $P(s_1) = 2 \cdot 10^{-3}$, $P(s_2) = 10^{-3}$, $P(a_{1,2}) = 3 \cdot 10^{-3}$ отримуємо $P(\mathbf{S}_{2,a}^r) = 8 \cdot 10^{-6}$. Можна зробити висновок, що на безвідмовність системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$ більше впливає надійність підсистеми s_1 , що резервується, аніж надійність резервної підсистеми s_2 .

Зменшимо ймовірність відмови автоматичного перемикача на резерв вдвічі. При $P(s_1) = 10^{-3}$, $P(s_2) = 2 \cdot 10^{-3}$, $P(a_{1,2}) = 1,5 \cdot 10^{-3}$, маємо $P(\mathbf{S}_{2,a}^r) = 2,75 \cdot 10^{-6}$. При $P(s_1) = 2 \cdot 10^{-3}$, $P(s_2) = 10^{-3}$, $P(a_{1,2}) = 1,5 \cdot 10^{-3}$ отримуємо $P(\mathbf{S}_{2,a}^r) = 3,5 \cdot 10^{-6}$. Тобто чим надійнішим є автоматичний перемикач на резерв, тим менше він впливає на безвідмовність системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$ в цілому, і навпаки. Якщо ймовірність відмови автоматичного перемикача на резерв зменшити на порядок, в порівнянні з ймовірностями відмов основної й резервної підсистем, то можна практично виключити його вплив на безвідмовність системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$ в цілому. Наприклад, при $P(s_1) = 2 \cdot 10^{-3}$, $P(s_2) = 10^{-3}$ і $P(a_{1,2}) = 3 \cdot 10^{-4}$ ймовірність $P(\mathbf{S}_{2,a}^r) =$

$2,06 \cdot 10^{-6}$ практично рівна добутку ймовірностей $P(s_1)$ та $P(s_2)$, тобто ймовірності відмови системи з повним резервуванням.

Імовірнісне моделювання можливості катастрофічного розвитку аварії на гідроагрегаті №2 Саяно-Шушенської ГЕС в 2009 р. як відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв.

Саяно-Шушенська ГЕС, яка розташована в верхній течії р. Єнісей, має встановлену потужність 6400 МВт. Це найпотужніша ГЕС Росії і шоста за потужністю ГЕС у світі. До аварії 2009 р. виробляла майже 15% електроенергії, яку виробляють всі ГЕС ВАТ «РусГідро», і до 2% загального об'єму електроенергії, що виробляють всі електростанції Росії [25, 62, 88].



Рис. 3.2. Машинний зал Саяно-Шушенської ГЕС до (а) та після аварії (б) 2009 р.

На момент аварії, що сталася 17 серпня 2009 р., на ГЕС працювали 9 з 10 агрегатів. Вранці, в 8:13 за місцевим часом, відбулося катастрофічне руйнування агрегату №2 зі зривом турбінної кришки й надходженням через шахту гідроагрегата під великим напором значних об'ємів води. Руйнувань і пошкоджень зазнали дев'ять з десяти гідроагрегатів, були повністю зруйновані стіни та перекриття машинного залу в районі розташування агрегатів №2, 3, 4, загинуло 75 працівників ГЕС (рис. 3.2).

В результаті аварії відбулося повне скидання навантаження ГЕС, знеструмлення всіх її систем, пропали оперативний зв'язок, освітлення, вийшли з ладу системи автоматики й сигналізації. Автоматичні системи, що мали зупинити агрегати, спрацювали лише на агрегаті №5, направляючий апарат якого було автоматично закрито. Затвори на водоводах до інших агрегатів залишались відкритими, вода продовжувала поступати на турбіни, що посилювало аварію.

Безпосередніми причинами аварії на агрегаті №2 було визнано динамічні навантаження й вібрації, руйнування вузлів кріплення агрегату та турбінної кришки, що, зрештою, й призвело до зриву кришки й розгерметизації напірного водоводу агрегату №2 [62, 88, 203]. Але можна припустити, що наслідки аварії на ГЕС були б значно меншими за умови спрацювання систем автоматики, що відповідає за перекриття направляючих апаратів уцілілих агрегатів та напірних водоводів аварійно-ремонтними затворами [119, 126, 126, 144, 222].

В якості умови катастрофічного розвитку аварії 2009 р. на Саяно-Шушенській ГЕС розглядалася відмова зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв $\mathbf{S}_{2,a} = \{s_1, a_{1,2}, s_2\}$ у складі: агрегат ГЕС – основна підсистема (s_1); аварійний затвор – підсистема, що перебуває в «холодному» резерві (s_2); автоматичний перемикач на резерв ($a_{1,2}$). Моделювання здійснювалося згідно з формулою (3.12) як ймовірності відмови системи з автоматичним перемиканням на резерв. Результати моделювання наведено на рис. 3.3, 3.4.

На рис. 3.3 наведено графіки залежності ймовірності розвитку аварії від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ при наступних значеннях ймовірностей відмов підсистеми s_1 (ймовірностей руйнування напірного тракту гідроагрегата через незалежні від роботи автоматики причини): 1) $P(s_1) = 10^{-1}$, рік⁻¹; 2) $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-2}$, рік⁻¹; 3) $P(s_1) = 10^{-2}$, рік⁻¹; 4) $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹; 5) $P(s_1) = 10^{-3}$, рік⁻¹. Ймовірність $P(s_2)$ відмови аварійно-ремонтного затвору, що перекриває напірний тракт гідроагрегата (підсистеми s_2), приймалася згідно зі статистичними даними [211] рівною $P(s_2) = 10^{-2}$, рік⁻¹.

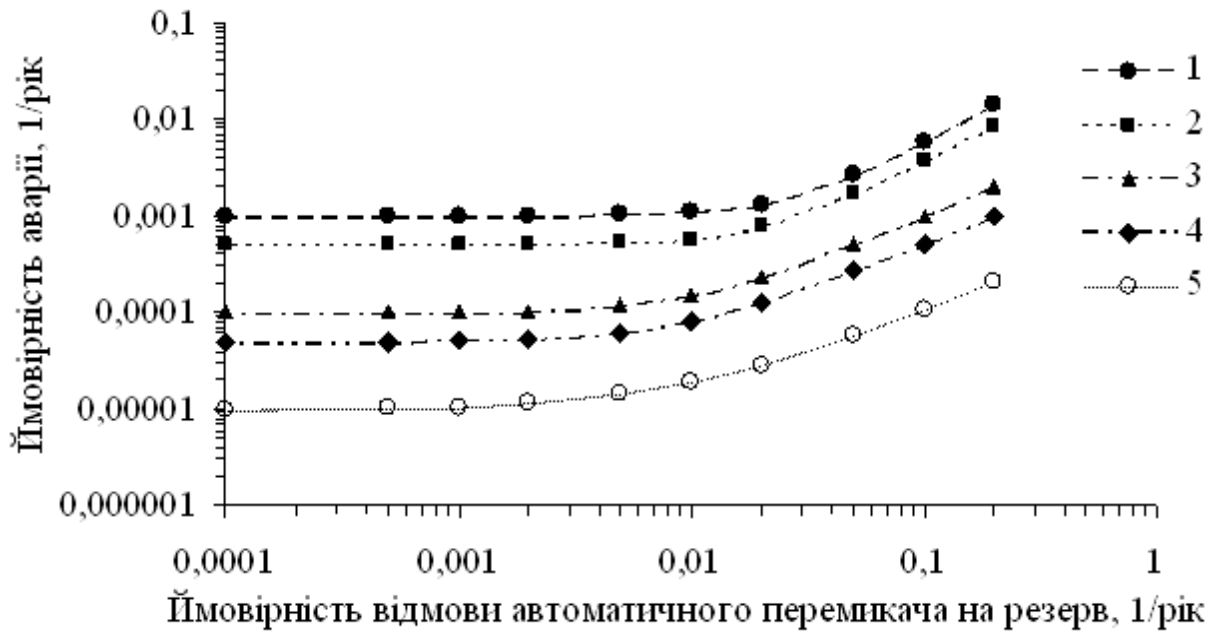


Рис. 3.3. Графіки залежності ймовірності розвитку аварії на Саяно-Шушенській ГЕС від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ при різних значеннях ймовірності руйнування гідроагрегата

Додатково було проаналізовано вплив надійності аварійно-ремонтного затвору на ймовірність катастрофічного розвитку аварії на ГЕС. При цьому ймовірність $P(s_1)$ руйнування гідроагрегата в результаті незалежних від роботи автоматики причин (відмови підсистеми s_1) приймалася рівною $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-2}$, рік⁻¹. Ця ймовірність визначає 95% надійність конструкції напірного тракту гідроагрегату проти розгерметизації, яка відповідає її граничному, згідно з чинними нормами [152], значенню.

Моделювання можливості катастрофічного розвитку аварії на Саяно-Шушенській ГЕС здійснювалося при наступних значеннях ймовірності відмови аварійно-ремонтного затвору (підсистеми s_2): 1) $P(s_2) = 10^{-1}$, рік⁻¹; 2) $P(s_2) = 5 \cdot 10^{-2}$, рік⁻¹; 3) $P(s_2) = 10^{-2}$, рік⁻¹; 4) $P(s_2) = 5 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹; 5) $P(s_2) = 10^{-3}$, рік⁻¹. Результати імовірнісного моделювання наведено на рис. 3.4.

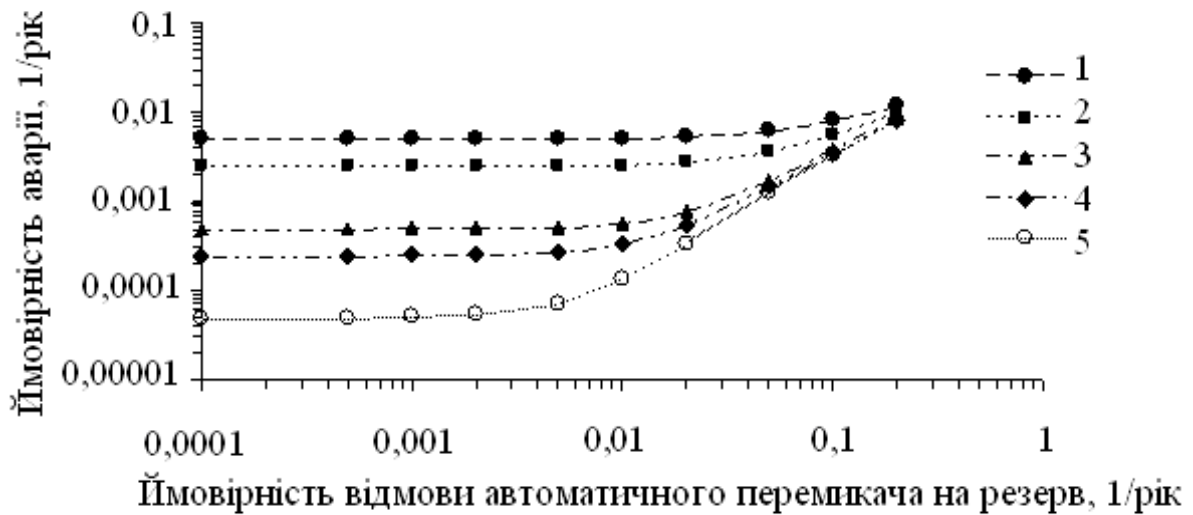


Рис. 3.4. Графіки залежності ймовірності розвитку аварії на Саяно-Шушенській ГЕС від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ при різних значеннях ймовірності відмови аварійно-ремонтного затвору

В результаті проведеного чисельного моделювання було встановлено наступне. Якщо ймовірність відмови автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ перевищувала величину близьку до 10^{-2} , рік⁻¹, то ймовірність катастрофічного розвитку аварії на Саяно-Шушенській ГЕС за умов, що склалися на гідроагрегаті №2, могла різко зрости навіть при незначному прирості ймовірності відмови автоматики.

3.2. Оцінка ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження

Розглянемо систему $S_{1,a} = \{s_1, s_a\}$, в якій здійснюється автоматичне регулювання навантаження [118]. Нехай склад такої системи формують дві підсистеми [118, 156]: підсистема, яка власне і виконує загальносистемну функцію

системи $\mathbf{S}_{1,a}$, її ми позначили як s_1 ; підсистема (автомат), що здійснює автоматичне регулювання навантаження на s_1 у складі $\mathbf{S}_{1,a}$, її позначено як s_a .

Нехай $P(s_1)$ – ймовірність первинної (незалежної від s_a) відмови підсистеми s_1 при виконанні загальносистемної функції $\mathbf{S}_{1,a}$ за відсутності перевантаження; $P(s_a)$ – ймовірність відмови підсистеми при здійсненні автоматичного регулювання навантаження на підсистему s_1 у складі $\mathbf{S}_{1,a}$; $P(s_{1,\theta})$ – ймовірність вторинної (залежної) відмови підсистеми s_1 при виконанні загальносистемної функції $\mathbf{S}_{1,a}$ внаслідок перевантаження.

Введемо додаткові позначення. Через $\bar{\theta}$ позначимо умову безвідмовної роботи автоматичного регулювання в системі $\mathbf{S}_{1,a} = \{s_1, s_a\}$, через $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$ – аварійну подію в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ за умови $\bar{\theta}$, через $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ – аварійну подію в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ за умови θ , коли відмовляє автоматичне регулювання.

Умови θ , $\bar{\theta}$, за визначенням, формують повну групу подій. Відповідно аварійні події $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$, $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ – несумісні, і повна ймовірність аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$, згідно з формулою повної ймовірності, буде:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}) = P(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta}) + P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta), \quad (3.13)$$

де $P(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$, $P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ – ймовірності виникнення аварійних подій $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$, $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ в системі $\mathbf{S}_{1,a}$, відповідно.

Ймовірність аварійної події $(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta})$ можна визначити через ймовірності відмов $P(s_1)$ та $P(s_a)$:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}, \bar{\theta}) = P(s_1) \cdot (1 - P(s_a)). \quad (3.14)$$

У випадку події $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ спочатку має відбутися відмова автоматики (s_a) , а далі має відмовити підсистема s_1 . Нехай $P(s_a)^*$ – ймовірність того, що відмова підсистеми s_a відбудеться раніше, ніж відмовить підсистема s_1 . Тоді [165] гранична оцінка повної ймовірності аварійної події $(\mathbf{S}_{1,a}, \theta)$ буде:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta) = 2 \cdot P(s_a)^* \cdot P(s_{1,\theta}). \quad (3.15)$$

Для того щоб оцінити ймовірність $P(s_a)^*$ розглянемо наступні ймовірності. Нехай $P(s_a \cup s_1)$ – ймовірність того, що відмовить будь-яка з підсистем, підсистема s_a або підсистема s_1 ; $P(s_a | s_a \cup s_1)$ – умовна ймовірність відмови автоматики (s_a) в ситуації, коли відмовляє будь-яка з підсистем – s_1 або s_a . Тоді, згідно з формулою добутку ймовірностей

$$P(s_a)^* = P(s_a | s_a \cup s_1) \cdot P(s_a \cup s_1), \quad (3.16)$$

де ймовірність $P(s_a | s_a \cup s_1)$ – байєсівська ймовірність, яка згідно з формулою Байєса [29, 137, 109] буде:

$$P(s_a | s_a \cup s_1) = \frac{P(s_a \cup s_1 | s_a) \cdot P(s_a)}{P(s_a \cup s_1)}, \quad (3.17)$$

де $P(s_a \cup s_1 | s_a)$ – умовна ймовірність події $(s_a \cup s_1)$, коли відмовляє будь-яка з підсистем – s_1 або s_a , при відмові s_a , якщо дотримуються умови повної групи.

З врахуванням означення 4 (§ 2.1) маємо:

$$P(s_a \cup s_1 | s_a) = \frac{P(s_a)}{P(s_a) + P(s_{1,\theta})}, \quad (3.18)$$

$$P(s_a)^* = \frac{2 \cdot P(s_a)^2}{P(s_a) + P(s_{1,\theta})}, \quad P(\mathbf{S}_{1,a}, \theta) = \frac{2 \cdot P(s_a)^2 \cdot P(s_{1,\theta})}{P(s_a) + P(s_{1,\theta})}. \quad (3.19)$$

Звідки повна ймовірність виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$ буде:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}) = P(s_1) \cdot (1 - P(s_a)) + \frac{2 \cdot P(s_a)^2 \cdot P(s_{1,\theta})}{P(s_a) + P(s_{1,\theta})}. \quad (3.20)$$

На рис. 3.5 наведено залежності ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження від надійності різних її структурних одиниць. Моделювання здійснювалося при заданому значенні ймовірності первинної відмови підсистеми s_1 , яке приймалось рівним $P(s_1) = 10^{-3}$, рік⁻¹, та наступних значеннях ймовірності вторинної (залежної) відмови підсистеми $P(s_{1,\theta})$: 1) $P(s_{1,\theta}) = 1$, рік⁻¹; 2) $P(s_{1,\theta}) = 10^{-1}$, рік⁻¹; 3) $P(s_{1,\theta}) = 10^{-2}$, рік⁻¹; 4) $P(s_{1,\theta}) = 10^{-3}$, рік⁻¹; 5) $P(s_{1,\theta}) = 5 \cdot 10^{-4}$, рік⁻¹; 6) $P(s_{1,\theta}) = 10^{-4}$, рік⁻¹.

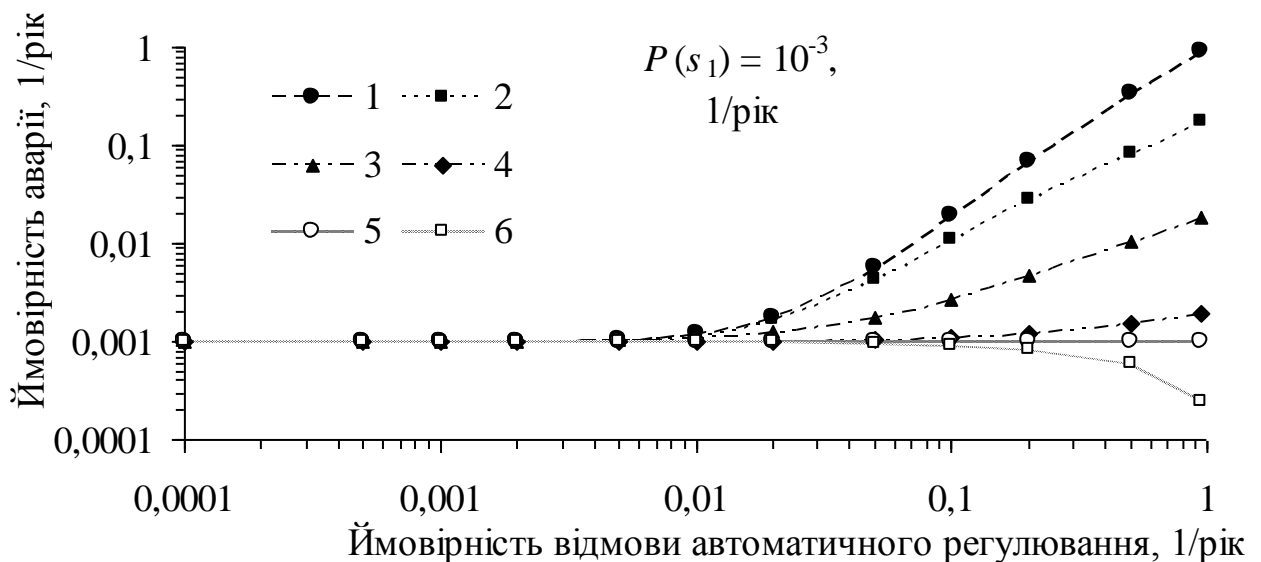


Рис. 3.5. Графіки залежності ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження від надійності її структурних одиниць

Імовірнісне моделювання можливості виникнення аварії на верховому басейні ГАЕС Таум Саук в 2005 р. як відмови системи з автоматичним регулюванням навантаження.

В якості модельного сценарію аварії на верховому басейні ГАЕС Таум Саук (рис. 3.6), що сталася в 2005 р. [232, 233], розглядався сценарій переповнення верхової водойми ГАЕС внаслідок відмови системи автоматичного регулювання рівня води з наступним переливом води через огорожувальну дамбу.



Рис. 3.6. Верховий басейн ГАЕС Таум Саук (США) до (а) та після аварії (б) 2005 р.

Аварія на верховому басейні ГАЕС могла б і не відбутися, якби на стадії модернізації гідропоруд окрім системи автоматичного регулювання рівня води в басейні було передбачено і облаштування аварійного водозливу, з метою уникнення переповнення водойми при відмові автоматики [119, 126, 126, 144, 222].

При імовірнісному моделюванні можливості виникнення аварії на верховому басейні ГАЕС розглядалася система $\mathbf{S}_{1,a} = \{s_1, s_a\}$ в складі двох підсистем: дамби огороження верхового басейну – підсистеми s_1 , яка виконує загальносистемну функцію системи $\mathbf{S}_{1,a}$; підсистеми s_a , яка здійснює автоматичне регулювання рівня води і таким чином регулює навантаження на s_1 у складі $\mathbf{S}_{1,a}$. Оскільки дамба огороження була виконана з ґрунтових матеріалів, то ймовір-

ність вторинної відмови підсистеми s_1 при виконанні загальносистемної функції $S_{1,a}$ як ймовірність руйнування дамби від перевантаження (переповнення водойми) внаслідок відмови автоматики, приймалася рівною одиниці: $P(s_{1,0}) = 1$.

В цьому випадку маємо ймовірність аварії на верховому басейні ГАЕС:

$$P(S_{1,a}) = P(s_1) \cdot (1 - P(s_a)) + \frac{2 \cdot P(s_a)^2}{P(s_a) + 1} \quad (3.21)$$

Моделювання здійснювалося при наступних значеннях ймовірності первинної відмови (ймовірності руйнування дамби огороження басейну через незалежні від роботи автоматики причини): 1) $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-3}$, рік $^{-1}$; 2) $P(s_1) = 10^{-3}$, рік $^{-1}$; 3) $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$; 4) $P(s_1) = 10^{-4}$, рік $^{-1}$; 5) $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$. Результати моделювання наведено на рис. 3.7.

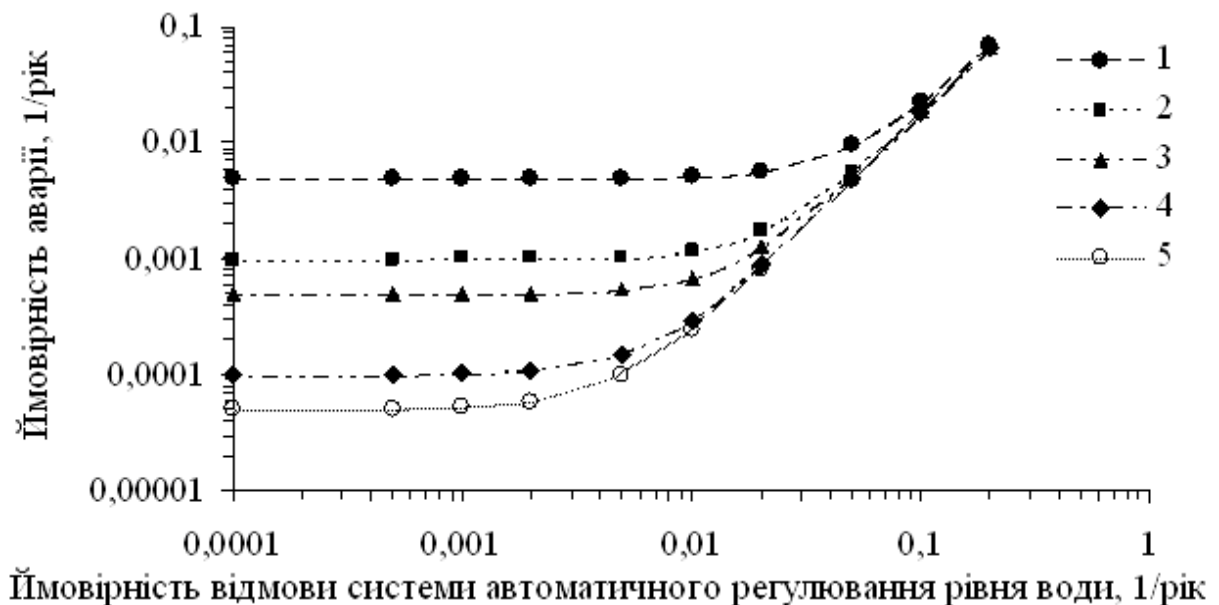


Рис. 3.7. Графіки залежності ймовірності виникнення аварії на верховому басейні ГАЕС Таум Саук від ймовірності відмови системи автоматичного регулювання рівня води

В результаті проведеного моделювання можливості аварії на верховій водоймі ГАЕС Таум Саук за прийнятим модельним сценарієм з кількісною оцінкою ймовірностей її виникнення було встановлено наступне. У випадку, якщо ймовірність відмови системи автоматичного регулювання рівня води в верховому басейні ГАЕС перевищувала величину 10^{-2} , рік⁻¹, то ймовірність такої аварії могла різко зрости навіть при незначному прирості ймовірності відмови автоматики й практично не залежала від надійності дамби огороження.

3.3. Оцінка ймовірностей сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскаді гідроспоруд

Каскад напірних гідроспоруд у складі кількох гідровузлів в річковому басейні або напірні гідроспоруди окремого гідровузла, що мають різне висотно-географічне положення на місцевості, утворюють природно-технічні системи, які володіють аварійним потенціалом каскаду маси й енергії [158]. Гідродинамічна аварія (ГДА) [28, 58, 86], яка виникає внаслідок руйнівної аварії на гідроспоруді, що розташовується вище за течією, поширюється на каскад і при несприятливому збігові обставин створює загрозу послідовного руйнування й інших гідроспоруд, які розташовані вниз за течією [161].

В історії гідротехнічного будівництва мали місце аварії на каскадах напірних гідроспоруд, що завершувалися їх послідовним руйнуванням, в тому числі з катастрофічними наслідками. Одна з найбільших в історії подібних катастроф відбулася на р. Жу в Китаї в 1975 р. при руйнуванні гребель Шимантань та Банняця. Під час цієї аварії внаслідок потужної штучної повені, загинуло біля 26 тис. людей, майже 145 тис. осіб померло опісля від голоду й епідемій. Було зруйновано біля 6 млн. будинків. Загалом внаслідок аварії постраждало майже 11 млн. осіб. Аварії на каскадах напірних гідроспоруд відбувалися також в

США (греблі Тетон і Лауер Ідайхо Фоллз, 1976 р.), в Бразилії (греблі Еуклідес да Кун'я та Армандо де Салес ді Олівейра, 1977 р.) та в інших країнах [65].

Будівництво каскадів з напірних гідроспоруд поширене явище, як в світі, так і в Україні [36]. Найбільші напірні гідроспоруди в Україні побудовані у складі каскадів гідровузлів: Дніпровського і Дністровського. Зокрема, на Дніпрі знаходиться каскад з шести найбільших гідровузлів країни: Київського, Канівського, Кременчуцького, Дніпродзержинського, Дніпровського, Каховського. Унікальний каскад напірних гідроспоруд розміщено також на Дністрі у складі Дністровської ГЕС-1, Дністровської ГАЕС і Дністровської ГЕС-2 (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Дністровський гідроенергетичний комплекс у складі гідроспоруд трьох гідровузлів (карти Google earth)

У складі Київського гідровузла різне висотно-географічне положення на місцевості мають напірні гідропоруди Київської ГЕС і Київської ГАЕС. Каскади напірних гідропоруд є на Південному Бузі, Случі, на інших ріках країни. В планах розвитку гідроенергетики України розглядається будівництво в межах Дніпровського каскаду Канівської ГАЕС, нових ГЕС в басейні Дністра в його верхній течії, каскадів ГЕС на Тисі та її притоках [76].

Безперечно, що розміщення кількох напірних гідропоруд в каскаді може створювати загрозу їх послідовного руйнування [28, 36, 65].

Визначимо гідродинамічну аварію на каскаді як аварію, в результаті якої буде зруйновано не менше двох підпірних гідропоруд, що мають різне висотно-географічне положення в каскаді [121]. Тоді, в залежності від кількості гідропоруд в каскаді, їх висотно-географічного і просторового розміщення на річці або в річковому басейні (див. нижче рис. 3.9) аварійного потенціалу окремих гідропоруд, можливі різні сценарії поширення ГДА на каскаді. Кожен з цих сценаріїв не лише може бути обтяжений різними негативними наслідками і збитками [193], а й мати різну ймовірність реалізації.

У випадку каскаду з двох гідропоруд можливий один варіант поширення ГДА на каскаді: руйнується напірна гідропоруда, що розміщується в верх за течією, і далі може зруйнуватися гідропоруда низового гідровузла. На каскаді з трьох гідропоруд можливі вже два модельні сценарії розвитку ГДА на каскаді: 1) руйнується напірна гідропоруда, що розміщується в верх за течією, далі можуть зруйнуватися гідропоруди двох низових гідровузлів (при розміщенні всіх трьох гідровузлів в каскаді один за одним) або гідропоруда низового гідровузла (якщо один з верхових гідровузлів розміщується на притоці головної ріки й знаходиться поза загрозою); 2) руйнується гідропоруда, що розміщується на другій сходинці каскаду (це може бути і гідровузол, що розміщується на притоці), далі – гідропоруда, розміщена вниз за течією (рис. 3.9).

В усіх випадках для поширення ГДА на каскаді гідропоруд існує пріоритет аварії на тій напірній гідропоруді, що розміщується в верх за течією, і аварія на якій може загрожувати хоча б одній з наступних гідропоруд каскаду.

При цьому мінімальна кількість модельних сценаріїв поширення ГДА на каскаді гідровузлів може становити $n-1$, де n – кількість гідроспоруд у каскаді.

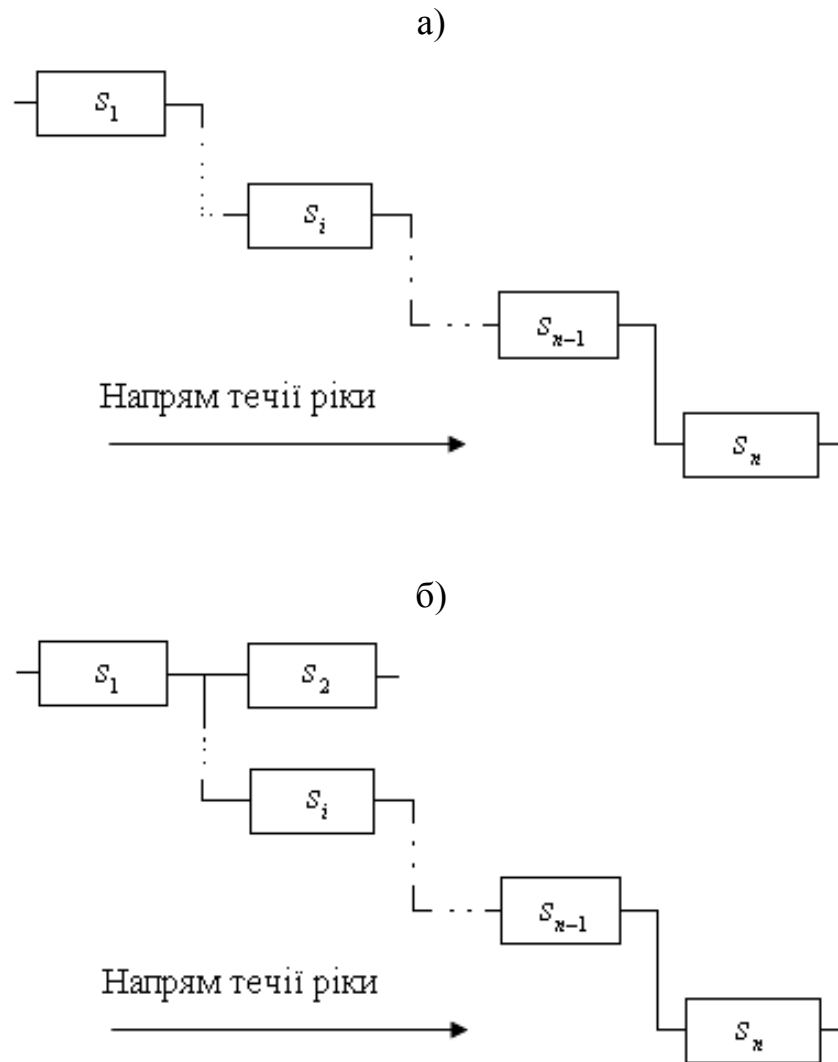


Рис. 3.9. Схематичні варіанти каскадів з n гідроспоруд

Розглянемо довільний каскад $\mathbf{S}(n) = \{s_i\}$, $i = \overline{1, n}$, з n гідроспоруд $s_i \in \mathbf{S}(n)$, що мають різне висотно-географічне та просторове положення на місцевості в річковому басейні. Задамо загальний напрямок розташування гідроспоруд в каскаді від s_1 до s_n вниз за течією ріки, від найвищої до найнижчої за висотно-географічним і просторовим положенням «сходинок» каскаду (рис. 3.9). Аварії на окремих гідроспорудах, що формують каскад, до виникнення першої ГДА,

що може загрожувати іншим гідроспорудам, вважатимемо сумісними й стохастично незалежними подіями:

$$P(s_i, s_j) = P(s_i) \cdot P(s_j), \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j, \quad (3.22)$$

де $P(s_i, s_j)$ – ймовірність одночасного виникнення аварії на i -й і j -й гідроспорудах каскаду; $P(s_i)$, $P(s_j)$ – апіорні ймовірності аварій на i -й і j -й гідроспорудах, що формують каскад, відповідно.

Для оцінки ймовірності поширення ГДА на каскаді важливо встановити підпирні гідроспоруди, аварії на яких та умови за яких при аварії на тій чи іншій підпирній гідроспоруді «запускають» механізми подальшого розвитку аварії. Найбільш просто умова для поширення ГДА на каскад може формулюватися в тому випадку, коли витрати води від хвилі прориву внаслідок аварії на гідроспоруді, що розташовується вище за течією, перевищуватимуть пропускну здатність водопропускних гідроспоруд гідровузла, що знаходиться нижче за течією ріки, і так далі, тобто якщо хвиля прориву внаслідок руйнування кожної вище розташованої гідроспоруди, яка переповнюватиме кожне наступне водосховище, що знаходиться вниз за течією, здатна послідовно зруйнувати гідроспоруди кожного наступного гідровузла в каскаді незалежно від поточного стану його напірного та водопропускного фронтів.

Виділимо одну з верхових гідроспоруд $s_i \in \mathbf{S}(n)$, $i = \overline{1, n-1}$, гідродинамічна аварія на якій може поширитися на інші (хоча б на одну з них) гідроспоруди каскаду $\mathbf{S}(n)$. Визначимо гідроспоруди, на які поширюватиметься дія ГДА, якщо аварія сталася на гідроспоруді s_i , й складемо систему $S(m_i) = \{s_j\}$, $j \geq i$, з $m_i = n + 1 - i$ гідроспоруд, для якої буде здійснюватися оцінка ймовірності поширення ГДА на каскаді за відповідним модельним сценарієм.

Випадок 1. Нехай умовні ймовірності вторинних (наведених) аварій на гідроспорудах каскаду від переваантажень, пов'язаних з проходженням ГДА в результаті аварії на гідроспоруді s_i , розташованій вище за течією, при реаліза-

ції модельного сценарію A_i поширення ГДА в системі $S(m_i)$ наближаються до одиниці. Якщо аварія на гідроспоруді s_i здатна безпосередньо призвести до вторинної гідродинамічної аварії на наступній «сходинці» каскаду $S(m_i)$, а та, в свою чергу, пошириться й на всі наступні «сходинки» $S(m_i)$ з послідовним руйнуванням всіх підпірних гідроспоруд, що розташовані нижче за течією, то ймовірність реалізації сценарію A_i згідно з (2.4) буде:

$$P(A_i) = P(A_i | \mathbf{S}(n)) \cdot P(\mathbf{S}(n)). \quad (3.23)$$

Ймовірність $P(A_i | \mathbf{S}(n))$ є байєсівською ймовірністю, яка, згідно з формулою Байєса (2.7), у нових позначеннях ймовірностей подій буде:

$$P(A_i | \mathbf{S}(n)) = \frac{P(\mathbf{S}(n) | s_i) \cdot P(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(\mathbf{S}(n) | s_i) \cdot P(s_i)}, \quad (3.24)$$

де $P(\mathbf{S}(n) | s_i)$ – умовна ймовірність поширення ГДА на каскаді $\mathbf{S}(n)$ з врахуванням можливості виникнення ГДА на гідроспоруді s_i , яку, з врахуванням умови формування повної групи подій, згідно з (2.9), можна оцінити як відносну «вагу» (див. Означення 4, § 2.1) апіорної ймовірності аварії на s_i :

$$P(\mathbf{S}(n) | s_i) = \frac{P(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}. \quad (3.25)$$

Ймовірність $P(\mathbf{S}(n))$ згідно з умовою (3.22) та формулою (1.5) буде:

$$P(\mathbf{S}(n)) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(s_i)], \quad (3.26)$$

де $P(s_i)$ – апіорна ймовірність виникнення аварії на i -й напірній гідроспоруді у складі каскаду $S(n)$.

В результаті маємо повну апостеріорну ймовірність i -го модельного сценарію розвитку ГДА на каскаді

$$P(A_i) = \frac{\frac{P^2(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P^2(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)} \right)} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(s_i)] \right). \quad (3.27)$$

Приклад. Нехай у складі каскаду знаходиться шість напірних гідроспоруд $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$, які розміщуються в каскаді згідно зі схемою, наведеною на рис. 3.9а. Апіорні ймовірності аварій на гідроспорудах каскаду складають: $P(s_1) = 6,73 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(s_2) = 5,26 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(s_3) = 2,42 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(s_4) = 5,4 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(s_5) = 3,9 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(s_6) = 2,65 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$.

Покладемо, що гідродинамічна аварія на одній із гідроспоруд, які розташовуються вище за течією, почергово призводить до переповнення водосховища і аварії з проривом напірного фронту кожної наступної гідроспоруди.

В цьому випадку можливим буде один з наступних модельних сценаріїв поширення ГДА на каскаді:

A_1 – якщо руйнується гідроспоруда s_1 , а за нею гідроспоруди s_2, s_3, s_4, s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_1 \div s_6)$);

A_2 – якщо руйнується гідроспоруда s_2 і з нею гідроспоруди s_3, s_4, s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_2 \div s_6)$);

A_3 – якщо руйнується гідроспоруда s_3 , а за нею гідроспоруди s_4, s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_3 \div s_6)$);

A_4 – якщо руйнується гідроспорода s_4 і з нею гідроспороди s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_4 \div s_6)$);

A_5 – якщо руйнується гідроспорода s_5 і з нею s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_5, s_6)$).

Використавши формулу (3.27), встановлюємо ймовірності модельних сценаріїв поширення гідродинамічної аварії на каскаді гідроспоруд: $P(A_1) = 9,17 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(A_2) = 5,6 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(A_3) = 1,19 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(A_4) = 5,9 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$; $P(A_5) = 3,08 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$.

З метою перевірки точності проведених нами розрахунків визначимо також апостеріорну ймовірність аварії на споруді s_6 , за умови, що ГДА на каскаді $\mathbf{S}(n)$ відбувається внаслідок її руйнування:

$$P(A_6) = P(A_6 | \mathbf{S}(n)) \cdot P(\mathbf{S}(n)). \quad (3.28)$$

Маємо ймовірність $P(A_6) = 1,42 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$. Склавши суму ймовірностей $P(A_1) \div P(A_6)$ маємо повну ймовірність $P(\mathbf{S}(n)) = 2,636 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$ виникнення ГДА на каскаді, яку можна отримати за формулою (3.26).

Випадок 2. Гідродинамічна аварія на гідроспоруді, яка розташовується в каскаді вище за течією, може спровокувати вторинні (наведені) аварії на наступних гідроспорудах, що формують відповідний каскад, але з ймовірностями, що можуть бути значно меншими за одиницю.

Ймовірність вторинної (наведеної) аварії на гідроспоруді може встановлюватися в індивідуальному порядку, в залежності від параметрів водосховища, особливостей формування напірного і водопропускного фронтів гідровузла тощо, стійкості і живучості споруди в умовах перевантажень.

В першому наближенні, ймовірність вторинної аварії на гідровузлі в результаті прориву гідроспоруди, що розташовується вище за течією, можна оцінити як ймовірність перевищення рівня води у водосховищі через нездатність

водопропускних споруд гідровузла пропустити сумарний приплив води, включно надлишковий приплив, сформований хвилею прориву, без додаткового форсування рівня води понад прийнятий в проекті форсований (аварійний) підпирний рівень води у водосховищі. При цьому можуть встановлюватися додаткові модельні сценарії поширення ГДА в каскаді. Наприклад, якщо при аварії на гідроспоруді, яка розташована на вершині каскаду, з ймовірністю близькою до одиниці може постраждати лише наступна в каскаді гідроспоруда, а ймовірності руйнування інших менше одиниці, то ймовірність поширення ГДА на весь каскад зменшується. Загальна ж кількість модельних сценаріїв поширення ГДА на каскаді з n гідроспоруд при врахуванні здатності окремих гідровузлів протистояти техногенній повені може скласти $\sum_{m=2}^n (m-1)$.

Ймовірність реалізації k -го модельного сценарію $A_{i,k}$ поширення ГДА на каскаді з n гідроспоруд внаслідок аварії на i -й гідроспоруді з врахуванням ймовірностей виникнення вторинних (наведених) аварій на j -х гідроспорудах, $j = \overline{i+1, n}$, які розташовуються нижче за течією, буде:

$$P(A_{i,k}) = P(A_i) \cdot \prod_{j=i+1}^n P(s_{j,i}), \quad (3.29)$$

де $P(A_i)$ – ймовірність сценарію A_i поширення ГДА на каскаді гідроспоруд $S(m_i)$, яка встановлюється за формулою (3.27); $P(s_{j,i})$ – ймовірність вторинної, наведеної аварії на j -й гідроспоруді, на яку може поширюватися дія від аварії на i -й гідроспоруді, та від інших гідроспоруд, що розташовуються вище за течією, у випадку їх руйнування.

Нехай для наведеного вище прикладу встановлюються наступні ймовірності вторинних, наведених аварій на гідроспорудах каскаду при аварії на гідроспоруді s_1 : $P(s_{2,1}) = 1$; $P(s_{3,1}) = 0,003$; $P(s_{4,1}) = 1$; $P(s_{5,1}) = 0,5$; $P(s_{6,1}) = 0,5$.

Тоді ймовірності: сценарію $A_{1,1}$, що гідродинамічна аварія при руйнуванні гідроспоруди s_1 пошириться також на гідроспоруду s_2 , буде $P(A_{1,1}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) = 9,17 \cdot 10^{-5}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,2}$, що аварія на гідроспоруді s_1 пошириться також на гідроспоруду s_3 , буде $P(A_{1,2}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) = 2,75 \cdot 10^{-7}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,3}$, що далі зруйнується і гідроспоруда s_4 , буде $P(A_{1,3}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) \cdot P(s_{4,1}) = 2,75 \cdot 10^{-7}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,4}$, що зруйнується і гідроспоруда s_5 , буде $P(A_{1,4}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) \cdot P(s_{4,1}) \cdot P(s_{5,1}) = 1,38 \cdot 10^{-7}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,5}$, що ГДА пошириться на весь каскад $S(s_1 \div s_6)$: $P(A_{1,5}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) \cdot P(s_{4,1}) \cdot P(s_{5,1}) \cdot P(s_{6,1}) = 6,9 \cdot 10^{-8}$, рік⁻¹.

Аналіз результатів досліджень показує, що ймовірність поширення гідродинамічної аварії на каскад гідровузлів у випадку, коли напірна гідроспоруда, яка розташовується вище за течією, є менш надійною, ніж гідроспоруди, що розташовуються вниз за течією, і аварія на ній здатна викликати аварії на наступних гідроспорудах каскаду, може збільшуватися в порівнянні з апріорною ймовірністю аварії на цій споруді, хоча, звичайно, буде меншою ймовірності виникнення ГДА на каскаді. У випадку, коли напірна гідроспоруда, яка розташовується вище за течією, є більш надійною, ніж гідроспоруди, які розташовуються вниз за течією, і аварія на ній здатна викликати руйнування наступних споруд каскаду, ймовірність поширення ГДА вниз по течії на каскад зменшується в порівнянні з апріорною ймовірністю аварії на цій споруді.

Інший важливий висновок за результатами проведених досліджень полягає в тому, що ймовірність поширення ГДА на каскад при наявності у його складі гідровузлів, які здатні протистояти хвилі прориву, акумулювати штучну повінь у водосховищах, безаварійно пропускати її через водопропускні споруди, зменшується в порівнянні з апріорними ймовірностями виникнення ГДА як на окремих гідроспорудах каскаду, так і з повною ймовірністю ГДА на каскаді.

3.4. Оцінка ймовірностей системних аварій на гідровузлах внаслідок відмов водоскидних споруд за пропускною здатністю

Водоскидні гідроспоруди (водоскиди) (рис. 3.10) – гідроспоруди, призначені для скиду з верхнього б'єфа в нижній б'єф чи в басейн сусідньої ріки надлишків води в період проходження паводків та водопіль, – є невід'ємною частиною гідровузлів, незалежно від їх призначення, складу гідроспоруд, розмірів, відповідальності, приналежності тощо. Серед інших гідроспоруд в складі гідровузлів водоскиди відрізняються тим, що навіть у вільному стані, в якому вони можуть перебувати тривалий час й безпосередньо не використовуватися за призначенням, виконують особливу системну функцію, яка стосується забезпечення безпеки гідроспоруд гідровузла в цілому [28]. Водоскиди повинні бути постійно готовими до організованого пропуску надлишкових витрат води [35].



Пропуск паводку через поверхневий водозлив на Дністровському гідровузлі (р. Дністер, Україна)



Пропуск паводку через береговий водоскид Саяно-Шушенського гідровузла (р. Єнісей, Росія)

Рис. 3.10. Приклади водоскидних споруд в процесі роботи

Водоскиди є не тільки об'єктами високої відповідальності в складі гідровузлів, а й спорудами, на зведення яких витрачаються значні кошти. Інколи вартість водоскидів досягає 50% і більше від загальної вартості гідровузла, включ-

но греблю, дамби, будівлю гідроелектростанції, інші споруди [33]. При цьому водоскиди можуть використовуватися за призначенням тільки в екстремальних випадках – при пропуску паводків малої ймовірності перевищення [28, 33, 35].

В той же час прорахунки щодо параметрів водоскидів, невдала їх конструкція, економія на їх вартості, можуть обернутися катастрофічними наслідками – аваріями на напірних гідроспорудах гідровузлів [52]. В результаті відмови водоскидних споруд за пропускною здатністю виникає загроза переповнення водосховища з наступним проривом напірного фронту гідровузла. За статистичними даними біля 33% всіх аварій на напірних гідроспорудах так чи інакше пов'язуються з відмовами водоскидів за пропускною здатністю [1, 28, 83, 226].

Зважаючи на суттєве посилення повеневої небезпеки на ріках, зокрема у зв'язку з антропогенними змінами на водозборах та глобальними кліматичними змінами, старіння гідроспоруд, що знаходяться в тривалій експлуатації, в тому числі і водоскидів, механічного обладнання, що на них встановлюється, питання адекватної оцінки надійності водоскидних споруд та прогнозування аварійних ситуацій внаслідок їх відмов за пропускною здатністю набувають особливої актуальності. Наразі, в багатьох країнах світу, впроваджуються програми спеціалізованих обстежень та реконструкції водоскидних споруд (один з прикладів – будівництво нового берегового водоскиду на Саяно-Шушенському гідровузлі, див. рис. 3.10), розробляються нові підходи до оцінки їх надійності та безпеки, в тому числі і імовірнісними методами [28, 210, 234]. Актуальною є ця проблема і для України, де з 2001 р. розгортається загальнонаціональна програма забезпечення безпеки гідроспоруд Дніпровського і Дністровського каскадів ГЕС [95], здійснюється відновлення малих ГЕС, планується будівництво нових гідровузлів на Дністрі і Тисі тощо [76].

Серед основних причин виникнення аварій на гідровузлах внаслідок відмов водоскидних споруд за пропускною здатністю виділяються [28, 52, 234]:

- невідповідність розрахункової пропускної здатності водоскидів параметрам максимального притоку води у водосховище при паводках і водопіллях через неточність гідрологічного прогнозу, а також внаслідок проривів розташова-

них вище за течією гребель, дамб, заторів і зажорів; проблема актуалізується при будівництві гідроспоруд на ріках, що слабо вивчені в гідрологічному відношенні, та при будівництві каскадів гідроспоруд;

- невідповідність дійсної пропускної здатності водоскидів розрахунковій через блокування водопропускних отворів плаваючими тілами (сміттям, лісом тощо, див. нижче рис. 3.11), наносами, шугою, кригою, і порушення гідравлічного режиму роботи водопропускних споруд [204, 210, 234]; ймовірність відмови водоскидів через їх блокування зростає на гідровузлах, що розміщуються в горах та передгір'ях, в тому числі і при влаштуванні автоматичних водоскидів; особливо небезпечним може бути блокування донних водоскидів та водоскидів на водосховищах, що мають малі корисні об'єми;

- несправний стан та відмови механічного устаткування на водоскидах (руйнування й заклинення в пазах затворів, відмова підйомних механізмів, що обслуговують затвори, у тому числі і в результаті відсутності електроживлення підйомних механізмів тощо) [28, 210];

- неготовність водоскидів до виконання функцій пропуску води через невиконання в повному об'ємі необхідних ремонтно-відновлювальних робіт; слід зазначити, що стан неготовності різних водопропускних споруд гідровузлів, що в цілому формують водоскидні фронти, в тому числі і неготовність протягом тривалого часу, не є рідкісним явищем на вітчизняних гідровузлах; так, наприклад, за оцінками, наведеними в [108], тривалість стану неготовності частини водопропускних споруд Київського гідровузла, що мають використовуватися при скиді розрахункового паводку, в деякі роки досягала кількох місяців, причому інколи ремонтно-відновлювальні роботи на водопропускних спорудах виконувалися і під час пропуску паводків.

Всі ці причини аналізуються і певною мірою враховуються при оцінці надійності водоскидів [28, 210, 234]. Однак серед факторів, що не достатньо враховуються слід виділити системний характер аварій, пов'язаних з відмовами водоскидів за пропускною здатністю.



Накопичення сміття у верхньому б'єфі греблі Терєбля-Рікської ГЕС (р. Терєбля, Україна)



Блокування водоскиду греблі Керкхоф в 1997 р. (р. Сан Хоакін, Каліфорнія, США)

Рис. 3.11. Приклади накопичення сміття у водосховищах та блокування ним водоскидів

Загальна постановка задачі. Водоскидні споруди слід розглядати як системи з неповним резервуванням [28], оскільки при скиді максимальних розрахункових витрат води, зазвичай, не володіють надмірністю і для того щоб здійснити пропуск максимального проектного паводка використовуються всі наявні можливості водоскидного фронту гідровузла. В той же час при менших паводках, які теж можуть нести загрозу, немає потреби приводити до дії всі можливості водоскидних споруд. Наприклад, на водоскидах з кількома водопропускними трактами пропуск води здійснюють частиною водоскидного фронту; коли водоскид з одним водопропускним трактом – піднімають затвор не на повну висоту. В таких випадках на водоскидах, як системах, виникає надмірність, яку надалі ми будемо називати неповним функціональним резервуванням [120].

На необхідності врахування ефектів неповного резервування – структурного та функціонального – при оцінці надійності гідроспоруд як систем, зокрема водопропускних споруд, вказувалося в роботах [28, 41, 146, 158, 164].

Розглянемо водоскид як систему $S(n)$, яка для виконання максимального функціонального запиту (скиду максимальної розрахункової витрати води)

$q_{\max,p}$ ймовірністю реалізації $P(q_{\max,p})$, має виконати n незалежних, в загальному випадку сумісних, елементарних операцій $s_i, i = \overline{1, n}$ (наприклад, для скиду паводку привести до дії, піднявши затвори, n водоскидних трактів, у відповідності до визначеної схеми маневрування за n кроків підняти затвор на повну висоту тощо):

$$P(s_i, s_j) = P(s_i) \cdot P(s_j), \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j, \quad (3.30)$$

де $P(s_i, s_j)$ – ймовірність одночасної реалізації елементарних подій-відмов при виконанні операцій s_i, s_j ; $P(s_i), P(s_j)$ – ймовірності елементарних відмов в системі $\mathbf{S}(n)$ при виконанні операцій s_i, s_j . Шукатимемо ймовірність відмови системи $\mathbf{S}(n)$ з врахуванням різних функціональних запитів.

3.4.1. Оцінка ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням

Зазвичай водоскидні тракти водоскидів, механічне обладнання на водоскидах відповідним чином уніфікуються, щоб окремі операції s_i з маневрування скидами води через різні водопропускні тракти або при різних підйомах затвора тощо були однаково надійними: $P(s_i) = P(s_j) = P(s), i, j = \overline{1, n}, i \neq j$. Назвемо таку систему однорідною [120] й позначимо її $\mathbf{S}_u(n)$.

Тоді умовна ймовірність відмови водоскиду як однорідної системи $\mathbf{S}_u(n)$ при виконанні максимального функціонального запиту $q_{\max,p}$ буде:

$$P(\mathbf{S}_u(n) | q_{\max,p}) = 1 - (1 - P(s))^n. \quad (3.31)$$

Відповідно безумовна ймовірність відмови $P(\mathbf{S}_u(n), q_{\max,p})$ водоскиду як однорідної системи $\mathbf{S}_u(n)$ при виконанні максимального функціонального запиту $q_{\max,p}$ з врахуванням ймовірності реалізації $P(q_{\max,p})$ запиту буде:

$$P(\mathbf{S}_u(n), q_{\max,p}) = P(\mathbf{S}_u(n) | q_{\max,p}) \cdot P(q_{\max,p}) = [1 - (1 - P(s))^n] \cdot P(q_{\max,p}). \quad (3.32)$$

Розглянемо деякий запит $q_j \in [q_{\min,p}, q_{\max,p}]$ до водоскиду як системи $\mathbf{S}_u(n)$ на множині можливих запитів \mathbf{Q} по забезпеченню пропуску витрат води: $q_j \in \mathbf{Q}$, $q_{j+1} < q_j$, $j = \overline{1, J}$, для виконання якого необхідно здійснити m незалежних, в загальному випадку сумісних, елементарних операцій s_i , $i = \overline{1, n}$ (до дії має бути приведено m з n водоскидних трактів тощо).

Тоді умовна ймовірність відмови водоскиду як однорідної системи $\mathbf{S}_u(n)$ при виконанні функціонального запиту q_j буде:

$$P(\mathbf{S}_u(n) | q_j) = \frac{m!}{n!(n-m)!} [1 - (1 - P(s))^m]. \quad (3.33)$$

Нехай $P_i(q_j)$ – нормована (приведена до повної групи подій) ймовірність запиту $q_j \in \mathbf{Q}$, $j = \overline{1, J}$, яку можна отримати згідно з правилами формування повної групи подій (див. § 2.5.2) – паводків з відповідними витратами води:

$$\begin{aligned} P_i(q_1) &= P(q_{\max,p}); \quad P_i(q_2) = P(q_2) - P(q_1); \quad \dots \\ \dots; \quad P_i(q_j) &= P(q_j) - P(q_{j-1}); \quad \dots; \quad P_i(q_J) = P(q_J) - P(q_{J-1}). \end{aligned} \quad (3.34)$$

Маємо безумовну ймовірність відмови $P(\mathbf{S}_u(n), q_j)$ водоскиду як системи $\mathbf{S}_u(n)$ при виконанні запиту q_j з врахуванням ймовірності його реалізації в системі подій, що формують повну групу:

$$P(\mathbf{S}_u(n), q_j) = \frac{m!}{n!(n-m)!} [1 - (1 - P(s))^m] \cdot P_i(q_j). \quad (3.35)$$

Повна ймовірність відмови $P(\mathbf{S}_u(n))$ водоскидної споруди за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням $\mathbf{S}_u(n)$ відповідно буде:

$$P(\mathbf{S}_u(n)) = \sum_{j=1}^J \frac{m!}{n!(n-m)!} [1 - (1 - P(s))^m] \cdot P_i(q_j). \quad (3.36)$$

3.4.2. Оцінка ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як неоднорідної системи з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів

На водоскидах, які не можуть розглядатися як однорідні системи, зазвичай, встановлюється певний порядок виконання елементарних операцій s_i :

$$s_1 \succ s_2, \dots, \succ s_i, \dots, \succ s_n, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.37)$$

що забезпечує виконання відповідних функціональних запитів з пропуску витрат води: $q_j \in \mathbf{Q}$, $q_{j+1} < q_j$, $j = \overline{1, J}$.

В (3.37) символом \succ позначено відношення «м'якого» підпорядкування за пріоритетом виконання різних елементарних операцій на водоскидній споруді, що розглядається як система, яка для реалізації максимального функціонального запиту (скиду максимальної розрахункової витрати води $q_{\max,p}$), має здійснити n незалежних і, в загальному випадку, неоднаково надійних сумісних, операцій s_i , $i = \overline{1, n}$:

$$P(s_i, s_j) = P(s_i) \cdot P(s_j), \quad P(s_i) \neq P(s_j) \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j, \quad (3.38)$$

де $P(s_i, s_j)$ – ймовірність одночасної реалізації елементарних подій-відмов при виконанні операцій s_i, s_j ; $P(s_i), P(s_j)$ – ймовірності елементарних відмов в системі $\mathbf{S}(n)$ при виконанні операцій s_i, s_j .

Назвемо таку систему неоднорідною [120] й позначимо її $\mathbf{S}_m(n)$.

Нехай виконання операції s_1 в системі $\mathbf{S}_m(n)$ має найвищий пріоритет порівняно з іншими операціями; далі – виконання операції s_2 – у порівнянні з наступними (за нумерацією) операціями і т. д.

Більш строгі підпорядкування неоднорідних операцій $s_i, i = \overline{1, n}$, наприклад, може мати місце при маневруванні затвором на різній висоті підйому. Без виконання попередньої операції неможливе виконання наступної, але виконання кожної наступної операції з покрокового підйому затвору включає в себе виконання попередньої операції (таким чином реалізується сумісність подій). Зазвичай, ймовірності відмов у виконанні операцій в цьому випадку зі зростанням їх індексу міняються немонотонно.

В принципі «м'який» порядок виконання операцій $s_i, i = \overline{1, n}$, у неоднорідній системі $\mathbf{S}_m(n)$ може порушуватися. Однак, встановлення певної впорядкованості (хоча і нестрогої, «м'якої») операцій в системі $\mathbf{S}_m(n)$ дозволяє при виконанні функціональних запитів спочатку використовувати більш надійні її структурні одиниці (наприклад, більш надійні водоскидні тракти, вже випробувані водопропускні споруди тощо). Крім того при порушенні порядку виконання операцій можуть виникати різного роду порушення в роботі інших гідроспоруд гідровузла, додаткові збитки тощо, що не рекомендується проектом та правилами експлуатації [28, 35].

Проаналізуємо аварію в системі $\mathbf{S}_m(n)$ при виконанні максимального функціонального запиту $q_{\max, p}$, яка може наступити при невиконанні будь-якої з операцій $s_i, i = \overline{1, n}$, але на першому кроці пріоритетною є відмова системи при здійсненні операції s_1 .

Ймовірність аварії в системі $\mathbf{S}_m(n)$ внаслідок відмови при виконанні операції s_1 згідно з правилом добутку ймовірностей [29, 137] буде:

$$P(A_1) = P(S_n) \cdot P(A_1 | S_n), \quad (3.39)$$

де $P(S_n)$ – ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_m(n)$, яку можна визначити як ймовірність невиконання будь-якої з операцій s_i , $i = \overline{1, n}$, за формулою (1.5); $P(A_1 | S_n)$ – умовна ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_m(n)$ при виконанні операції s_1 , яка згідно з формулою Байєса [29, 137, 109] буде:

$$P(A_1 | S_n) = \frac{P(S_n | s_1) \cdot P(s_1)}{\sum_{i=1}^n P(S_n | s_i) \cdot P(s_i)}, \quad (3.40)$$

де $P(S_n | s_1)$, $P(S_n | s_i)$ – умовні ймовірності відмов при виконанні операцій s_1 , s_i , відповідно, які встановлюються як «ваги» апріорних ймовірностей елементарних подій-відмов (див. Означення 4, § 2.1) в системі $\mathbf{S}_m(n)$ при виконанні s_i , s_j :

$$P(S_n | s_1) = \frac{P(s_1)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}, \quad P(S_n | s_i) = \frac{P(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}; \quad (3.41)$$

$$\sum_{i=1}^n (S_n | s_i) = \Omega, P(\Omega) = 1; (S_n | s_i) \wedge (S_n | s_j) = \emptyset, i \neq j, \sum_{i=1}^n P(S_n | s_i) = 1. \quad (3.42)$$

Якщо система $\mathbf{S}_m(n)$ безвідмовно виконала операцію s_1 , то з переходом до виконання операції s_2 отримуємо систему $\mathbf{S}_m(n-1)$, яка має виконати $n-1$ незалежних операцій s_i , $i = \overline{2, n}$. Ймовірність аварії в системі $\mathbf{S}_m(n-1)$ внаслідок відмови при виконанні операції s_2 при цьому буде:

$$P(A_2) = P(S_{n-1}) \cdot P(A_2 | S_{n-1}), \quad (3.43)$$

$$P(A_2 | S_{n-1}) = \frac{P(S_{n-1} | s_2) \cdot P(s_2)}{\sum_{i=2}^n P(S_{n-1} | s_i) \cdot P(s_i)}, \quad (3.44)$$

$$P(S_{n-1} | s_2) = \frac{P(s_2)}{\sum_{i=2}^n P(s_i)}, \quad P(S_{n-1} | s_i) = \frac{P(s_i)}{\sum_{i=2}^n P(s_i)}; \quad (3.45)$$

$$\sum_{i=2}^n (S_{n-1} | s_i) = \Omega, P(\Omega) = 1; (S_{n-1} | s_i) \wedge (S_{n-1} | s_j) = \emptyset, i \neq j, \sum_{i=2}^n P(S_{n-1} | s_i) = 1. \quad (3.46)$$

При виконанні операції s_k , $k = \overline{1, n-1}$, маємо систему $S_m(n-k+1)$, ймовірність аварії в якій внаслідок відмови при операції s_2 буде:

$$P(A_k) = P(S_{n-k+1}) \cdot P(A_k | S_{n-k+1}), \quad (3.47)$$

$$P(A_k | S_{n-k+1}) = \frac{P(S_{n-k+1} | s_k) \cdot P(s_k)}{\sum_{i=k}^n P(S_{n-k+1} | s_i) \cdot P(s_i)}, \quad (3.48)$$

$$P(S_{n-k+1} | s_k) = \frac{P(s_k)}{\sum_{i=k}^n P(s_i)}, \quad P(S_{n-k+1} | s_i) = \frac{P(s_i)}{\sum_{i=k}^n P(s_i)}; \quad (3.49)$$

$$\sum_{i=k}^n (S_{n-k+1} | s_i) = \Omega, P(\Omega) = 1; (S_{n-k+1} | s_i) \wedge (S_{n-k+1} | s_j) = \emptyset, i \neq j, \sum_{i=k}^n P(S_{n-k+1} | s_i) = 1. \quad (3.50)$$

В результаті отримуємо умовну ймовірність відмови водоскиду як неоднорідної системи $S_m(n)$ при виконанні максимального функціонального запиту $q_{\max,p}$, яка з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів буде:

$$P(\mathbf{S}_m(n) | q_{\max,p}) = P(A_1) + (1 - P(A_1)) \cdot P(A_2) + \dots + \sum_{i=k}^{n-k+1} (1 - P(A_{k-1})) P(A_k) + \dots \\ \dots + (1 - P(A_{n-1})) P(A_n), \quad (3.51)$$

де ймовірність $P(A_n) = P(s_n)$.

У випадку довільного запиту $q_j \in [q_{\min,p}, q_{\max,p}]$ до водоскиду як системи на множині можливих запитів \mathbf{Q} із забезпечення пропуску витрат води ($q_j \in \mathbf{Q}$, $q_{j+1} < q_j$, $j = \overline{1, J}$), для виконання якого послідовно здійснюється m елементарних операцій s_i , $i = \overline{1, m}$ (до дії приводиться m відібраних із загальної кількості n пріоритетних водоскидних трактів тощо), умовна ймовірність відмови водоскиду як неоднорідної системи $\mathbf{S}_m(m)$ відповідно буде:

$$P(\mathbf{S}_m(m) | q_j) = P(A_1) + (1 - P(A_1)) \cdot P(A_2) + \dots + \sum_{i=k}^{m-k+1} (1 - P(A_{k-1})) P(A_k) + \dots \\ \dots + (1 - P(A_{m-1})) P(A_m), \quad (3.52)$$

де ймовірність $P(A_m) = P(s_m)$.

Повна ймовірність відмови $P(\mathbf{S}_m(n))$ водоскиду за пропускнуою здатністю як неоднорідної системи $\mathbf{S}_m(n)$ з неповним функціональним резервуванням з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів при цьому буде:

$$P(\mathbf{S}_m(n)) = \sum_{j=1}^J P(\mathbf{S}_m(m) | q_j) \cdot P_i(q_j), \quad (3.53)$$

де $P_i(q_j)$ – нормована ймовірність запиту $q_j \in \mathbf{Q}$, $j = \overline{1, J}$, яка визначається згідно з правилом (3.34).

3.5. Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано актуальність прогнозування нетипових сценаріїв системних аварій на гідровузлах в рамках байєсівського підходу з використанням апостеріорних (байєсівських) ймовірностей подій-припущень.

2. Розглянуто практичні задачі оцінки ймовірностей розвитку системних аварій на гідровузлах, пов'язаних з відмовами автоматики. Отримано рішення щодо ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв. Вперше поставлено і розв'язано задачу оцінки ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження. Здійснено ретроспективне прогнозування можливості катастрофічного розвитку аварії на гідроагрегаті №2 Саяно-Шушенської ГЕС в 2009 р. за сценарієм відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та імовірнісне моделювання можливості виникнення аварії на верховому басейні ГАЕС Таум Саук в 2005 р. за сценарієм відмови системи з автоматичним регулюванням навантаження.

3. Проаналізовано особливості аварійності гідровузлів у складі каскадів. Здійснено постановки задач оцінки ймовірностей різних сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскадах гідроспоруд та отримано практичні рішення з імовірнісного прогнозування поширення системних аварій на каскадах.

4. Здійснено постановки задач оцінки ймовірностей системних аварій на гідровузлах внаслідок відмов водоскидних споруд за пропускною здатністю як систем з неповним резервуванням. Удосконалено метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням. Розроблено метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як неоднорідної системи з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [118-121, 125, 126, 144, 156, 158, 160, 161, 222].

РОЗДІЛ 4

УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ГІДРОВУЗЛІВ НА ОСНОВІ БАЙЄСІВСЬКИХ ОЦІНОК РИЗИКІВ АВАРІЙ

4.1. Загальні принципи та першочергові задачі управління безпекою гідровузлів з врахуванням ризиків аварій

В якості основного принципу управління безпекою гідровузлів з врахуванням ризику аварій нами приймається принцип розумно досяжного низького рівня ризику (risk as low as reasonably practicable, ALARP) [84, 155]. 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, які встановлюють межу терпимості техногенного ризику. Отримані при цьому розрахункові рівні ризику аварій як ймовірності аварій, ризики збитків або втрат тощо на гідровузлі можуть вважатися прийнятними у всіх випадках, коли вони є меншими за рівні ризику аварій, які відповідають встановленій межі терпимості, і коли подальше їх зменшення стає або практично неможливим (за наявних економічних, технологічних та ін. умов), або коли ціна такого зменшення стає непропорційно великою порівняно з отриманим при цьому зменшенням ризику і, відповідно, підвищенням надійності гідропоруди і безпеки населення.

Згідно з чинними в нашій країні нормами [49] оцінку надійності і безпеки гідротехнічних споруд допускається здійснювати імовірнісними методами. В результаті таких розрахунків повинні бути отримані розрахункові значення ймовірності виникнення аварій $P(A)$ на напірних гідропорудах гідровузла, які не повинні перевищувати допустимі значення $[P(A)]$:

$$P(A) \leq [P(A)], \quad (4.1)$$

де допустимі значення ймовірностей аварій встановлюються в залежності від класу наслідків (відповідальності) (табл. 4.1), до яких віднесені споруди.

Таблиця 4.1

Допустимі значення ймовірностей виникнення аварій на напірних гідро-технічних спорудах різних класів наслідків (відповідальності), 1/рік [49]

Клас (підклас) наслідків (відповідальності) гідроспоруд	Ймовірність виникнення аварії
СС3	$5 \cdot 10^{-5}$
СС2-1	$5 \cdot 10^{-4}$
СС2-2	$3 \cdot 10^{-3}$
СС-1	$6 \cdot 10^{-3}$

Таким чином встановлюється межа терпимості техногенного ризику, пов'язаного з аварійністю на гідроспорудах гідровузлів.

Принцип ALARP в управлінні безпекою гідровузлів з врахуванням ризику аварій дозволяє цілеспрямовано реалізувати й інші важливі принципи: придатності (доцільності), оптимізації й адаптивності [28, 154, 155].

Оскільки не тільки ймовірності, але і наслідки реалізації різних сценаріїв можуть різнитися, то управління ризиками аварій як комбінаціями ймовірностей аварійних подій і їх наслідків може бути гнучкішим й ефективнішим.

Так, визначення ризиків збитків від аварії в грошовому (економічному) еквіваленті дозволяє порівнювати величину додаткових затрат ΔC_i на реалізацію прийнятого i -го варіанта підвищення безпеки, що визначаються від затрат C_0 деякого базового (нульового) варіанта, з величиною, на яку при цьому знижуються ймовірні втрати (ризики збитків) ΔL_i , що визначаються від ймовірних втрат L_0 відповідного базового (нульового) варіанта [154, 155, 157].

При цьому принцип придатності (доцільності), згідно з яким додаткові затрати мають бути економічно доцільними і компенсуватися зниженням дода-

ткових, в порівнянні з прийнятим базовим (нульовим) варіантом, ймовірних втрат, можна записати у вигляді:

$$\Delta C_i \leq \Delta L_i, \quad (4.2)$$

де $\Delta C_i = C_i - C_0$, $\Delta L_i = L_0 - L_i$; C_0 , C_i – узагальнені приведені затрати на реалізацію відповідних варіантів дій – нульового та i -го; L_0 , L_i – ймовірні втрати (ризика збитків) при аварії на гідровузлі при вказаних варіантах дій.

Згідно з принципом оптимізації в якості прийнятного варіанта заходів щодо підвищення безпеки гідровузла може вибиратися альтернатива, яка забезпечує, наприклад, максимум функціоналу $\Delta L_i - \Delta C_i$:

$$\Delta L_i - \Delta C_i \rightarrow \max. \quad (4.3)$$

Величину ΔL_i в (4.3) можна трактувати як очікуваний додатковий виграш від i -го варіанта підвищення надійності і безпеки гідровузла в порівнянні з початковим, базовим рівнем його безпеки.

Згідно з концепцією адаптивності може бути вибрана альтернатива, за якої краще всього поєднуються додаткові затрати ΔC_i і додаткові виграші ΔL_i . Це може бути альтернатива, яка обтяжена меншим додатковим ризиком в порівнянні з іншими можливими альтернативами [146, 154, 155, 157]:

$$R_{ij} = \Delta C_i + \Delta L_j, \quad R_{ji} = \Delta C_j + \Delta L_i, \quad (4.4)$$

де R_{ij} , R_{ji} – повні додаткові ризики альтернатив, відповідно: i -ї в порівнянні з j -ю і j -ї в порівнянні з i -ю; $\Delta C_i = C_i - C_0$, $\Delta L_j = L_0 - L_j$, $\Delta C_j = C_j - C_0$, $\Delta L_i = L_0 - L_i$; C_0 , C_i , C_j – узагальнені приведені затрати на реалізацію відповідних альтернатив – нульової, i -ї та j -ї, відповідно; L_0 , L_i , L_j – ймовірні втра-

ти (ризика збитків) при аварії на гідровузлі при вказаних альтернативних заходах щодо підвищення його безпеки.

Таким чином, згідно з (4.1)÷(4.4) в повній мірі реалізується принцип розумно досяжного низького рівня ризику.

При оцінці ймовірності $P(A)$ аварії на гідровузлі здійснюється її агрегація (узагальнення) за різними аварійними подіями (сумісними і несумісними, залежними і незалежними). Відповідно при виконанні умови (4.1) гарантується нормативна надійність гідроспоруд і безпека гідровузла і за різними модельними сценаріями аварій, які розглядаються нами при оцінці ризику аварій як несумісні аварійні події-припущення [147, 164].

При моделюванні аварій на гідровузлах важливо враховувати можливість реалізації різних сценаріїв, в тому числі і гіпотетичних, що визначаються у формі подій-припущень. Для цього вибір модельних сценаріїв аварій на гідровузлах має ґрунтуватися на наступних принципах системного аналізу [149]:

- альтернативності, що допускає використання різних підходів, методів та моделей (статистичних, ймовірнісних, логічних тощо) при оцінці ймовірностей аварійних подій і станів, які здатні зумовлювати і обумовлювати аварії на гідровузлах за різними сценаріями;

- системності, що виходить із необхідності оцінки ймовірностей аварій на гідровузлах, які розглядаються як складні системи з врахуванням системних зв'язків між різними аварійними подіями на гідроспорудах, в основах, в навколишньому середовищі, відмовами та несправностями окремих конструктивних елементів, пристроїв, устаткування і обладнання;

- комплексності, що передбачає врахування при оцінці ймовірностей аварій на гідровузлах різних факторів (природних, проектно-конструкційних, будівельно-технологічних, експлуатаційних тощо), які можуть визначати надійність гідроспоруд, різних даних, зокрема, даних моніторингу навколишнього середовища, візуального й інструментального контролю стану гідроспоруд, результатів розрахунків стійкості і міцності гідроспоруд та окремих їх конструктивних

елементів традиційними методами, а також можливість реалізації як типових, так і нетипових сценаріїв аварії;

- ієрархії, згідно з яким враховується причинно-наслідкова супідрядність аварійних подій і станів, відмов і несправностей елементів гідроспоруд як структурних одиниць єдиної природно-технічної системи «гідровузол – навколишнє середовище»; при цьому при надмірній складності ієрархічної структури виділеної системи використовується 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;

- найменшої взаємодії, згідно з яким ієрархія розрахункових аварійних подій і станів, відмов і несправностей окремих структурних елементів і підсистем гідровузла як системи враховується таким чином, щоб мінімізувати причинно-наслідкові відношення між ними в рамках єдиної природно-технічної системи «гідровузол – навколишнє середовище».

Серед численних задач [7, 10, 11, 17, 28, 39, 63, 70, 71, 80, 83, 84, 95, 113, 114, 194, 215, 227], які можуть вирішуватися при управлінні безпекою гідровузлів на основі аналізу, оцінки та врахування ризику, виділяються наступні задачі.

1. Ранжирування аварійних подій на гідровузлі за значущістю.

Значущими прийнято називати окремі аварійні події, види, форми, причини аварії, або ж сценарії аварії, які прямо чи опосередковано можуть спричинити системну аварію на потенційно-небезпечному об'єкті (ПНО) [176].

Ранжирування аварійних подій за значущістю має за мету забезпечення кращого розуміння поведінки складної інженерної системи, реакцій окремих її структурних і функціональних одиниць на випадкові зміни зовнішніх впливів і умов експлуатації та виявлення заходів, які можуть бути найбільш ефективними для підвищення надійності і безпеки системи в цілому [122-124, 128, 129, 131]. Дослідження значущості аварійних подій подібне до аналізу чутливості і може бути також корисним при оптимізації структурного складу системи, діаг-

ностиці «слабких» ланок серед її компонентів, оптимізації надійності окремих структурних одиниць з врахуванням економічних показників тощо [176].

2. Обґрунтування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлах та вибір розрахункових максимальних проектних подій екстремального характеру малої ймовірності.

При управлінні безпекою гідровузлів при проектуванні чи експлуатації, як і інших складних систем та ПНО, завжди виникає задача обґрунтування деякої обмеженої, розрахункової множини аварійних подій [117, 130, 153, 166, 229], які підлягають контролю і врахуванню при оцінці безпеки, та вибору відповідних розрахункових значень екстремальних навантажень і режимів експлуатації малої ймовірності, при яких можуть забезпечуватися достатньо низькі, допустимі рівні залишкового ризику аварій у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику (ALARP). При цьому, звичайно, нехтують деякими малоймовірними аварійними подіями, і, відповідно, і ризиками, пов'язаними з ними, але завдяки проектним рішенням і експлуатаційним обмеженням, що встановлюються при виборі розрахункових (проектних) значень екстремальних навантажень і режимів експлуатації, що рідко повторюються, запобігають виникненню тих аварійних подій, що мають високу ймовірність реалізації.

3. Оптимізація числових характеристик (показників) надійності засобів автоматичного контролю і регулювання безпеки, що встановлюються на гідроспорудах, обладнанні та устаткуванні гідровузлів.

При проектуванні засобів автоматичного контролю і регулювання безпеки, що встановлюються на системах з заданим, нормативним рівнем надійності (безпеки) важливе значення може мати, як показали і наші дослідження (див. §§ 3.1, 3.2) оптимальне поєднання «внутрішньої» надійності і безпеки системи, процеси контролю і регулювання безпеки на якій підлягають автоматизації, і надійності засобів автоматизації, зокрема і з врахуванням того, що задана надійність і безпека системи, обладнаної засобами автоматичного контролю і регулювання безпеки, може забезпечуватися при мінімальних сукупних затратах.

Затрати на кожну зі структурних одиниць системи, обладнаної засобами автоматизації, можуть подаватися як функції їх надійності. При цьому, зазвичай, функції затрат монотонно зростають зі збільшенням надійності або ж монотонно спадають зі збільшенням ймовірностей відмов структурних одиниць системи. Відповідно можна ставити задачу оптимізації числових характеристик (показників) надійності структурних одиниць системи та засобів автоматизації, як задачу мінімізації сукупних затрат на систему при деякій заданій (граничній, допустимій) ймовірності її відмови P_0 [127].

4.2. Ранжирування аварійних подій на гідровузлі за значущістю в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей

Однією з важливих цілей ранжирування аварійних подій за значущістю в контексті управління безпекою є ідентифікація найбільш ймовірних сценаріїв аварій і сценаріїв аварій, обтяжених найбільшими ризиками збитків [124].

Ідентифікація найбільш ймовірного сценарію аварії та сценарію аварії, обтяженого найбільшим ризиком збитків, дає можливість обмежитися в ситуації дефіциту часу, матеріальних та інших засобів детальним розглядом і аналізом окремого виду або форми аварії, окремих аварійних подій-причин та умов, що можуть зумовлювати або обумовлювати відповідні сценарії аварій на гідровузлі. Це дозволить вже в короткостроковій перспективі розробити та провести необхідні заходи з метою підвищення безпеки об'єкта.

Кількісні показники значущості аварійних подій в технічних системах, що на разі розглядаються в літературі [6, 176, 209], в більшості своїй ґрунтуються на імовірнісній мірі.

Серед найбільш відомих показників значущості, що пропонуються різними авторами [6, 176, 209], виділяється значущість за Фусселем – Веслі, яка, зо-

крема, 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 (див. § 1.3.4).

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 [176].

Таким чином, значущість за Фусселем – Веслі для деякої базової аварійної події або для деякого перерізу аварійних подій (наприклад, модельного сценарію тощо) має визначатися як відносна «вага» відповідної аварійної події або відповідного перерізу аварійних подій за ймовірністю в повній ймовірності $P(A)$ системної аварії [176]. 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 слід враховувати і те, що різні події можуть бути обтяжені різними наслідками (збитками).

Сценарний підхід, що ґрунтується на байєсівському перетворенні ймовірностей [124, 128, 133, 149], дозволяє оцінити значущість модельних сценаріїв аварій і, відповідно, форм та причин аварій, що їх ініціюють і обумовлюють, як за ймовірністю їх реалізації, так і за ризиками збитків.

Використаємо означення сценарію аварії (див. Означення 2, § 2.1) і формулу (2.17) для визначення ймовірності його реалізації. Маємо значущість сценарію A_i згідно з Фусселем – Веслі за ймовірністю:

$$w_p(A_i) = \frac{P(A_i)}{P(A)} = \frac{P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i)}{\sum_{i=1}^n \left(P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i) \right)}, \quad (4.5)$$

або, у відсотках,

$$w_p(A_i)\% = \frac{P(A_i)}{P(A)} \cdot 100\% = \frac{P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i)}{\sum_{i=1}^n \left(P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i) \right)} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

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

Відповідно, значущість сценарію A_i за ризиком збитків (див. Означення 1, § 2.1) буде:

$$w_R(A_i) = \frac{P(A_i) \cdot D(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot D(A_i)}, \quad (4.7)$$

або, у відсотках,

$$w_R(A_i)\% = \frac{P(A_i) \cdot D(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot D(A_i)} \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

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

Нижче наведено ілюстративний приклад оцінки значущості модельних сценаріїв аварії на гідроспоруді за ймовірністю і ризиком збитків. Оцінка значущості модельних сценаріїв аварії на гідроспоруді здійснювалася за даними, які наведено в табл. 4.2. Окремі форми аварії (безпосередні причини, які могли призвести до аварії на гідроспоруді), що враховувалися, розглядалися як сумісні незалежні події. Кожній з виділених форм аварії відповідав окремий модельний сценарій, несумісний с іншими модельними сценаріями.

Таблиця 4.2

Чисельні характеристики форм аварії на гідроспоруді

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 нижче в табл. 4.3.

Ймовірності реалізації модельних сценаріїв встановлювалися за формулою (2.17). Повна ймовірність імовірність аварії $P(A) = 1,86 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹ виникнення аварії на гідроспоруді 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 (див. також § 1.3.2):

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^6 [1 - P(F_i)], \quad (4.9)$$

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

Таблиця 4.3

Чисельні характеристики модельних сценаріїв аварії на гідропоруді

Чисельні характеристики	Сценарії аварії A_i						Всього
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	
Ймовірності подій, рік ⁻¹	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$
Ризики збитків, млн. грн. рік ⁻¹	0,056	0,1	0,0575	0,02	0,01	0,00045	0,24395
Значущість $w_P(A_i)\%$	75,10	21,46	2,68	0,54	0,21	0,01	100
Значущість $w_R(A_i)\%$	22,95	41,00	23,57	8,2	4,1	0,18	100

Повний (сумарний) ризик збитків за модельними сценаріями $A_1 \div A_6$ склав 0,24395 млн. грн. на рік. Сума ймовірностей модельних сценаріїв при цьому склала $P(A) = 0,00186$, 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 сценарію A_1 за ймовірністю перевищила 75%, тоді як за ризиком збитків склала лише 22,95%. Найбільш значимим за ризиком збитків виявився сценарій A_2 , зі значущістю за ризиком 41,00% і за ймовірністю 21,46%.

Можна зауважити, що кількісна оцінка ризику збитків від аварій на гідровузлі з аналізом значущості аварійних подій за ризиком збитків може стати ефективним засобом вирішення проблеми забезпечення та підтримання належного рівня безпеки гідровузла з врахуванням економічного фактору при застосуванні принципу розумно досяжного низького рівня ризику. За результатами ранжирування аварійних подій за ризиком збитків може здійснюватися й економічне обґрунтування потреби в додаткових дослідженнях визначальних чинни-

ків аварійності. Ймовірності аварій, окремих її форм та сценаріїв, як величини малого порядку, надзвичайно тонко реагують на мінливість й невизначеність даних, на зміну ймовірностей виникнення елементарних аварійних подій в системі. Відповідно, навіть при незначній зміні ймовірностей базових аварійних подій, подій-умов, форм аварії на окремих гідропоруках, устаткуванні і обладнанні тощо, можуть змінюватися ризики збитків від різних сценаріїв аварії на гідровузлі, виявляючи таким чином проблемні місця [147, 162].

Оцінка значущості базових аварійних подій, що можуть призвести до аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС.

Водосховище-охолоджувач Хмельницької атомної електростанції (ХАЕС) (рис. 4.1) розміщується на р. Гнилий Ріг, правій притоці р. Вілії, недалеко від місця її впадіння в р. Горинь [122].

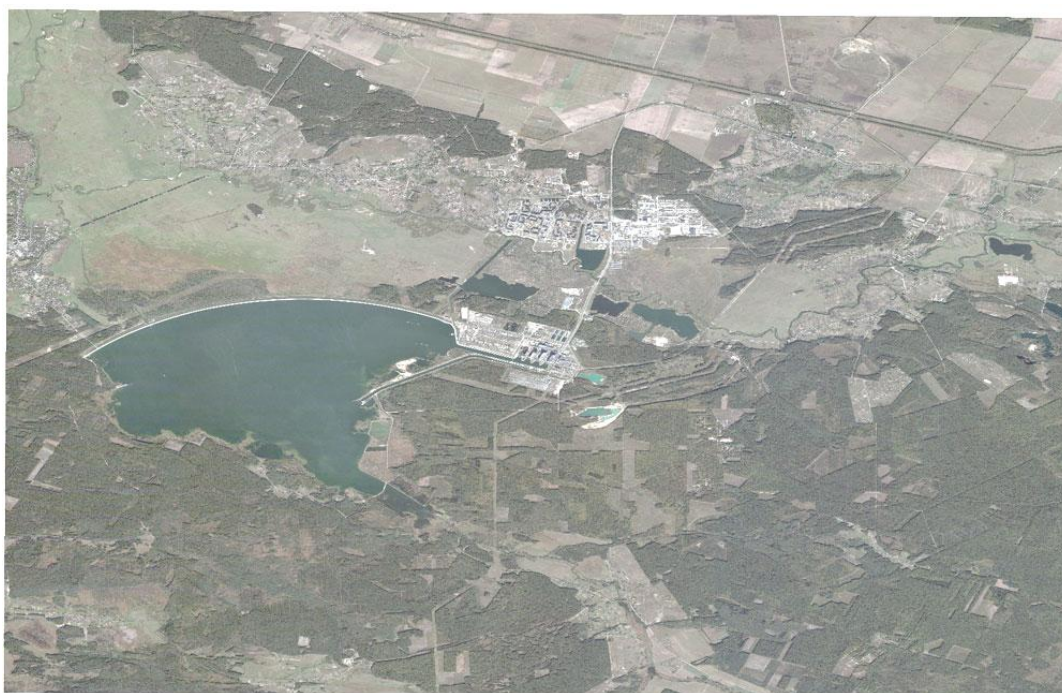


Рис. 4.1. Водосховище-охолоджувач ХАЕС

Водосховище, яке здатне виконувати функції багаторічного регулювання стоку р. Гнилий Ріг, утворюється криволінійною в плані земляною греблею, протяжністю до 7 км і максимальною висотою 13 м. Згідно з чинними в Україні

нормами [49] гребля водосховища ХАЕС відноситься до найвищого (СС3) класу відповідальності за наслідками. Від її надійності в значній мірі залежить безпека ХАЕС. При цьому аналіз причин аварій на земляних греблях показує, що однією з найбільш ймовірних причин виникнення аварій на цих спорудах є переповнення водосховища при паводках, яке може спричинити розвиток різних аварійних процесів. Серед них слід виділити перелив води через гребінь земляної греблі з наступним руйнуванням її тіла водними потоками. Крім того при переповненні водосховища можуть посилюватися суфозійні процеси в тілі, основі та в межуваннях земляної греблі з берегами і бетонними спорудами, з загрозою порушення фільтраційної міцності греблі, а також знижується стійкість низового укосу, що може раптово сповзти [13, 28, 52, 83].

Все це обумовлює актуальність задачі оцінки ймовірності переповнення водосховища-охолоджувача ХАЕС та встановлення найбільш значущих сценаріїв і причин виникнення відповідної аварійної ситуації.

В табл. 4.4 наведено значення паводкових витрат води р. Гнилий Ріг різної ймовірності перевищення, на рис. 4.2 – криву витрат при $p = 0,01\% \div 10\%$.

Таблиця 4.4

Паводкові витрати води р. Гнилий Ріг у створі греблі ХАЕС

Ймовірність перевищення p , %	0,01	0,1	1	2	5	10
Максимальна витрата води, м ³ /с	207	150	92,3	74,8	53,5	37

Пропуск розрахункового паводку 0,01% ймовірності перевищення (період повторення 10000 років) передбачено здійснювати через паводковий водоскид у складі шахтного водозливу автоматичного типу, що конструктивно суміщається з донним водоспуском. Витрата води, що проходить через водозлив при ФПР становить 110 м³/с. При форсуванні рівня вище 203,7 м пропуск надлишкової води здійснюється одночасно через автоматичний водозлив і донний водоспуск, для чого відкриваються глибинні робочі затвори.

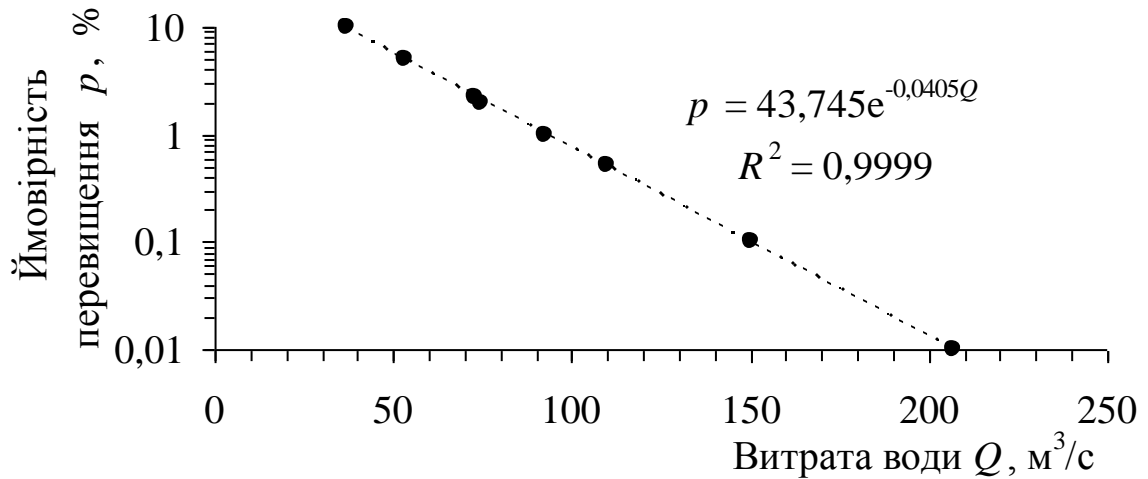


Рис. 4.2. Фрагмент кривої ймовірності перевищення максимальних витрат води p . Гнилий Ріг в створі греблі водосховища ХАЕС

Водозливний тунель паводкового водоскиду складається з трьох ниток водопропускних трактів, перекритих робочими затворами. У складі донного водоспуску знаходяться: сміттєзатримуючі решітки, ремонтні плоскі затвори, глибинні робочі плоскі затвори. Затвори обслуговуються електроталлю ТЕ-500-92120-00 вантажопідйомністю 5 т. Повний об'єм водосховища при нормальному підпірному рівні (НПР) (НПР = 203,0 м) складає 120 млн. м^3 , при форсованому підпірному рівні (ФПР = 203,7 м) ~ 132 млн. м^3 . Гідравлічними розрахунками було встановлено, що час переповнення водосховища до ФПР протягом якого може бути здійснено підйом глибинного затвору водоспуску при працездатному водоскиді і витраті до 207 $\text{м}^3/\text{с}$ складе не менше 16 годин; при витраті до 150 $\text{м}^3/\text{с}$ – не менше 22 годин; при блокуванні одного з трактів і витраті 110 $\text{м}^3/\text{с}$ (ймовірність перевищення 0,52% або $5,2 \cdot 10^{-3}$, рік $^{-1}$) – не менше 30 годин; при блокуванні двох трактів і витраті до 73,3 $\text{м}^3/\text{с}$ (ймовірність перевищення ~ 2,2% або $2,2 \cdot 10^{-2}$, рік $^{-1}$) – не менше 45 годин; при повному блокуванні водоскиду і витраті до 37 $\text{м}^3/\text{с}$ – не менше 90 годин.

Оцінка повної ймовірності переповнення водосховища здійснювалася логіко-імовірнісним методом дерев відмов і несправностей (див. § 1.3.4). Розрахункову діаграму дерева відмов і несправностей показано нижче на рис. 4.3.

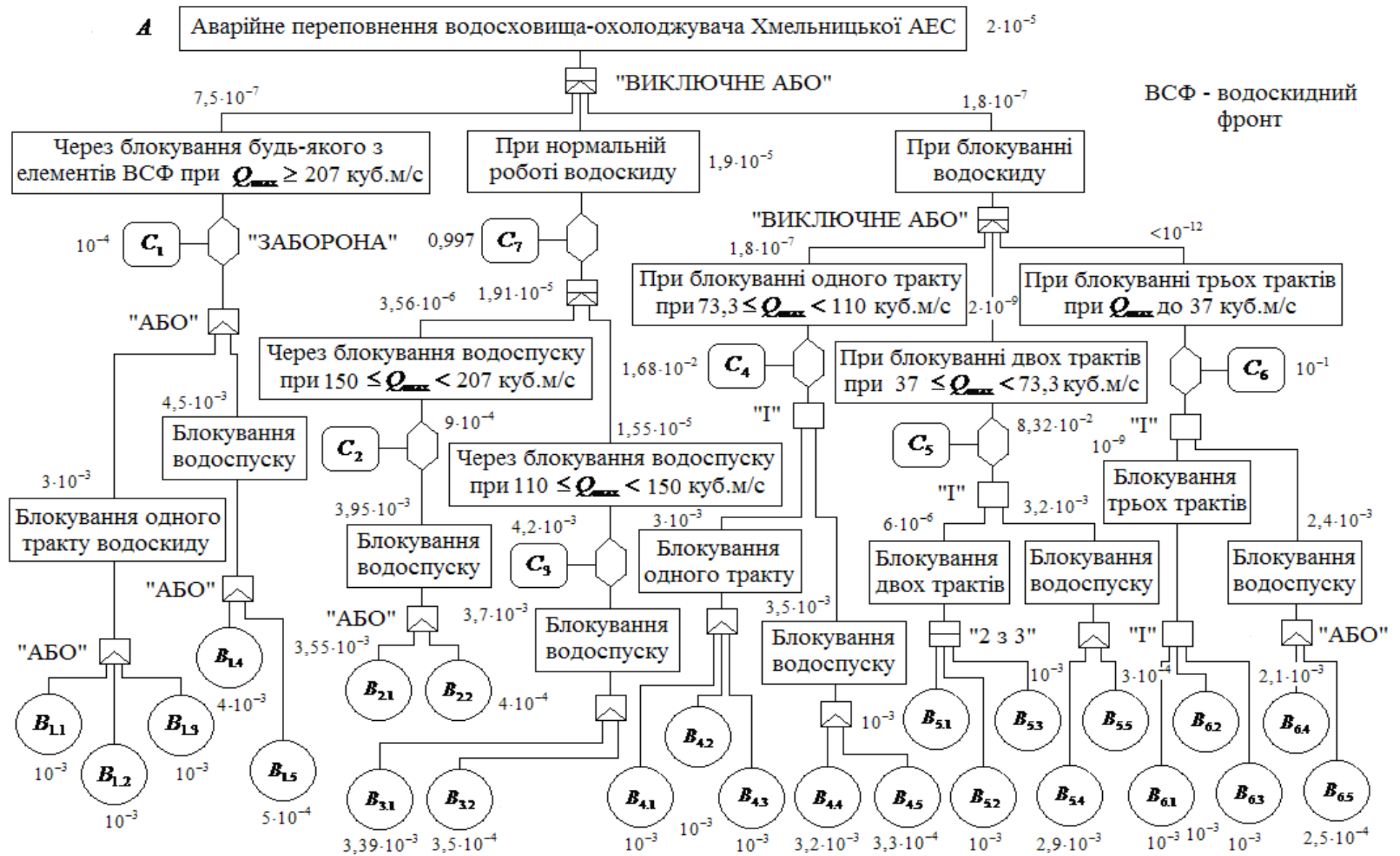


Рис. 4.3. Діаграма дерева відмов і несправностей для оцінки ймовірності переповнення водосховища ХАЕС

Основні формули, за якими оцінювалися ймовірності аварійних подій-наслідків за відомими ймовірностями аварійних подій-причин в залежності від дії відповідних логічних операторів, наведено в табл. 1.3. Ймовірність аварійної події-наслідку A при логічному операторі « M з N » визначалася за формулою:

$$P(A) = P(A)_m + P(A)_{m+1} + \dots + P(A)_n, \quad (4.10)$$

де $P(B_i) = P(B)$, $P(A)_m = (1 - (1 - P(B))^n) \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-1}) \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-m+1})$,
 $P(A)_{m+1} = P(A)_m \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-m})$, , $P(A)_n = P(B)^n$, $i = \overline{1, n}$, $m < n$.

Було виділено шість модельних ситуацій (умов) пропуску паводків на р. Гнилий Ріг, за яких очікується переповнення водосховища ХАЕС. Оцінка їх ймовірностей здійснювалася в рамках формування повної групи подій.

Ситуація C_1 – витрати води р. Гнилий Ріг перевищують $207 \text{ м}^3/\text{с}$ (аварія можлива при відмові будь-якого з елементів водопропускнуго фронту). Ймовірність реалізації C_1 : $P(C_1) = 10^{-4}$, рік $^{-1}$.

Ситуація C_2 – витрати води, що надходять у водосховище, перевищують $150 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $207 \text{ м}^3/\text{с}$ (шахтний водоскид працездатний, але заблоковано водоспуск; час, необхідний для підйому глибинного затвору водоспуску, приймається рівним 16 годинам). Ймовірність $P(C_2) = 9 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$.

Ситуація C_3 – витрати води р. Гнилий Ріг перевищують $110 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $150 \text{ м}^3/\text{с}$ (водоскид працездатний, заблоковано водоспуск; час, необхідний для підйому глибинного затвору водоспуску, приймається рівним 22 годинам). Ймовірність $P(C_3) = 4,2 \cdot 10^{-3}$, рік $^{-1}$. Сума $P(C_1) + P(C_2) + P(C_3)$ рівна ймовірності перевищення витрати $110 \text{ м}^3/\text{с}$ ($5,2 \cdot 10^{-3}$, рік $^{-1}$).

Ситуація C_4 – витрати води перевищують $73,3 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $110 \text{ м}^3/\text{с}$ (заблоковано один тракт водоскиду і заблоковано водоспуск; час, необхідний для підйому глибинного затвору водоспуску, приймається рівним 30 годинам). Ймовірність $P(C_4) = 1,68 \cdot 10^{-2}$, рік $^{-1}$.

Ситуація C_5 – витрати води перевищують $37 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $73,3 \text{ м}^3/\text{с}$ (заблоковано два тракти водоскиду і заблоковано водоспуск; час, необхідний для підйому глибинного затвору водоспуску, приймається рівним 45 годинам). Ймовірність $P(C_5) = 8,32 \cdot 10^{-2}$, рік $^{-1}$. Сума $P(C_4) + P(C_5)$ рівна ймовірності перевищення витрати $37 \text{ м}^3/\text{с}$ (10^{-1} , рік $^{-1}$).

Ситуація C_6 – витрати води досягають $37 \text{ м}^3/\text{с}$ (заблоковано три тракти водоскиду і водоспуск; час, необхідний для підйому глибинного затвору водоспуску, приймається рівним 90 годинам). Ймовірність $P(C_6) = 10^{-1}$, рік $^{-1}$.

Ситуація C_7 моделює нормальну роботу водоскиду. Її ймовірність оцінювалася як ймовірність знаходження шахтного водоскиду в працездатному стані:

$$P(C_7) = 1 - (1 - P(B_{1.1})) \cdot (1 - P(B_{1.2})) \cdot (1 - P(B_{1.3})), \quad (4.11)$$

де $P(B_{1.1})$, $P(B_{1.2})$, $P(B_{1.3})$ – ймовірності блокування першої, другої і третьої віток тунелю водоскиду при ситуації C_1 , відповідно.

З врахуванням можливості виявлення плаваючих тіл ще до того, як вони будуть накопичуватися біля шахти, ймовірності $P(B_{1.1})$, $P(B_{1.2})$, $P(B_{1.3})$ приймалися рівними 10^{-3} , рік $^{-1}$ [237]. Ймовірності блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому затвору (в тому числі через втрату живлення) при різних ситуаціях $C_1 \div C_6$ можна оцінити за формулою (1.4), (розрахунковий час служби механічного обладнання протягом якого очікується хоча б одна робоча операція приймався рівним одному року, $t = 1$ рік; інтенсивність відмов $\lambda = 4 \cdot 10^{-3}$, рік $^{-1}$; інтенсивність відновлення працездатності $\mu = 65$, рік $^{-1}$); додатковий час, що відпускається на відновлення працездатності системи «затвор-підйомний механізм» t_r , приймався рівним часу переповнення водосховища. Ймовірність блокування глибинних трактів водопропускних споруд через потрапляння в них топляка, наносів тощо приймалася рівною 10% від ймовірності блокування цих споруд внаслідок відмов механічного обладнання. Ймовірності базових аварійних подій на водоскиді, в результаті яких можливе переповнення водосховища в ситуаціях $C_1 \div C_6$, зведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Базові аварійні події на водоскиді водосховища ХАЕС при модельних ситуаціях пропуску паводків та їх розрахункові ймовірності

Подія	Опис базової аварійної події	Ймовірність
1	2	3
$B_{1.1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при C_1	10^{-3}
$B_{1.2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при C_1	10^{-3}
$B_{1.3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при C_1	10^{-3}
$B_{1.4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_1	$4 \cdot 10^{-3}$
$B_{1.5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_1	$5 \cdot 10^{-4}$
$B_{2.1}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_2	$3,55 \cdot 10^{-3}$
$B_{2.2}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_2	$4 \cdot 10^{-4}$
$B_{3.1}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_3	$3,39 \cdot 10^{-3}$
$B_{3.2}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_3	$3,5 \cdot 10^{-4}$
$B_{4.1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при C_4	10^{-3}
$B_{4.2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при C_4	10^{-3}
$B_{4.3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при C_4	10^{-3}
$B_{4.4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_4	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$B_{4.5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_4	$3,3 \cdot 10^{-4}$

Продовження табл. 4.5

1	2	3
$B_{5.1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при C_5	10^{-3}
$B_{5.2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при C_5	10^{-3}
$B_{5.3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при C_5	10^{-3}
$B_{5.4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_5	$2,9 \cdot 10^{-3}$
$B_{5.5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_5	$3 \cdot 10^{-4}$
$B_{6.1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при C_6	10^{-3}
$B_{6.2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при C_6	10^{-3}
$B_{6.3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при C_6	10^{-3}
$B_{6.4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_6	$2,1 \cdot 10^{-3}$
$B_{6.5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_6	$2,5 \cdot 10^{-4}$

В результаті розрахунку дерева відмов і несправностей (рис. 4.3) отримуємо повну ймовірність аварійного переповнення водосховища Хмельницької АЕС з врахуванням різних можливих базових аварійних подій на водоскиді та різних ситуацій скиду надлишкової води $P(A) = 2 \cdot 10^{-5}$, рік⁻¹.

Далі, кожна з базових аварійних подій-причин (табл. 4.5), які розглядалися спільно з відповідними подіями-умовами i , при необхідності (в залежності від дії логічного оператора) з іншими базовими подіями, пов'язувалась з можливою формою аварії F_i , $i = \overline{1, n}$, як окремим, незалежним перерізом значущих подій, які здатні викликати аварійне переповнення водосховища. За допомогою формули (2.17) розраховуємо ймовірності $P(A_i)$ відповідних модельних сценаріїв A_i , $i = \overline{1, n}$. Значущість базових аварійних подій оцінюємо за ймовірністю за формулою (4.6) як значущість відповідних їм модельних сценаріїв A_i , $i = \overline{1, n}$.

Як показали розрахунки значущості за ймовірністю, найбільш значущою базовою аварійною подією-причиною, настання якої може визначити можливість аварійного переповнення водосховища-охолоджувача ХАЕС, є подія $B_{3.1}$ – блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_3 , коли витрати води р. Гнилий Ріг перевищують $110 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $150 \text{ м}^3/\text{с}$ (водоскид повністю працездатний, заблоковано водоспуск). Значущість події $B_{3.1}$ за ймовірністю аварії: $w_p(B_{3.1})_{\%} = 93,98\%$. Далі, за рангом, з великим відривом ідуть події $B_{2.1}$ і $B_{3.2}$, значущість яких за ймовірністю, відповідно, склала: $w_p(B_{2.1})_{\%} = 4,73\%$; $w_p(B_{3.2})_{\%} = 1\%$. Сумарна значущість подій $B_{3.1}$, $B_{2.1}$ і $B_{3.2}$, за ймовірністю аварійного переповнення водосховища-охолоджувача ХАЕС, при цьому перевищує 99% . Відповідно на долю інших базових аварійних подій-причин припадає всього $\sim 1\%$ значущості.

4.3. Обґрунтування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлах та вибір розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності

Результати кількісної оцінки ризиків збитків аварії в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей на прикладі аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1, що розглядався нами в § 2.3, та результати оцінки значущості за ймовірністю базових аварійних подій-причин на прикладі аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС (§ 4.2), показують, що «внески» різних форм аварій на гідропорудах в загальний (сумарний) ризик збитків аварії на гідровузлі та «внески» окремих базових аварійних-подій причин у повну ймовірність аварії, і, відповідно, в повний ризик збитків аварії на гідропоруді можуть суттєво розрізнятися. Деякі з форм аварій і базових аварійних подій-

причин можуть давати незначний «вклад» як в повну ймовірність аварії на гід-ровузлі, так і в сумарний ризик збитків від аварії, і ними, при відповідному об-грунтуванні, варто нехтувати.

Розглянемо ілюстративний приклад оцінки сумарного ризику збитків від аварії в системі в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей згідно з запропонованим методом (див. §§ 2.1, 2.2) при даних, які наведено в табл. 4.6. Форми аварій розглядалися як незалежні, сумісні події. Ймовірність $P(A)$ аварії A визначалась за формулою (4.9). Ре-зультати розрахунків ризику збитків за відповідними сценаріями аварії та сума-рного ризику збитків від аварії наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.6

Ймовірності виникнення аварійних подій в системі і очікувані збитки $D(A_i)$, пов'язані з ними

Характеристики аварійних подій	Форми аварії					Аварія A
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	
$P(F_i), P(A)$	0,05	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0675
$D(A_i)$, млн. грн.	1	5	10	20	50	$\Sigma = 86$
$P(F_i) \cdot D(A_i)$, млн. грн.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	$\Sigma = 0,25$

Таблиця 4.7

Результати розрахунку повного ризику збитків від аварії в системі за да-ними табл. 4.6

Характеристики аварійних подій	Сценарії аварії					Аварія A
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	
$P(A_i), P(A)$	0,0641	0,0026	0,00064	0,00016	0,00003	0,0675
Ризики збитків, млн. грн.	0,0641	0,0128	0,00641	0,00320	0,00128	0,0878
Значущість $w_R(A_i)\%$	72,99	14,6	7,3	3,65	1,46	$\Sigma = 100$

Покладалось (для прикладу), що збитки (втрати) $D(A_i)$ за різними сценаріями A_i аварії A внаслідок реалізації відповідних форм F_i змінюються таким чином, що добутки $P(F_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$, $i = \overline{1,5}$. Однак, як показали розрахунки, ризики збитків за відповідними модельними сценаріями A_i різняться. При цьому сумарний ризик збитків від аварії в системі $R(D, A) = 0,0878$ млн. грн. виявився меншим за суму $\sum_{i=1}^5 P(F_i) \cdot D(A_i) = 0,25$ млн. грн. Максимальний «вклад» в сумарний ризик аварії вніс сценарій аварії A_1 ($w_R(A_1)\% = 72,99\%$), значущість якого за ймовірністю $w_p(A_1)\%$ сягає майже 95%.

Нехай найбільш ймовірна форма аварії F_1 проектом не допускається (її реалізація виключається) і, відповідно, при оцінці сумарного ризику збитків від аварії може не враховуватися. Розрахункове значення ймовірності аварії A при цьому безумовно зменшиться. Подивимось як поведе себе сумарний ризик збитків від аварії. Результати розрахунків ризику збитків від аварії A при неврахуванні (виключенні) аварійної події F_1 наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Результати розрахунку повного ризику збитків від аварії в системі за даними табл. 4.6 при виключенні форми аварії F_1

Характеристики аварійних подій	Сценарії аварії					Аварія A
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	
$P(A_i), P(A)$	0	0,01391	0,00348	0,00087	0,00014	0,0184
Ризики збитків, млн. грн.	0	0,06955	0,03477	0,01739	0,00695	0,12866
Значущість $w_R(A_i)\%$	0	54,06	27,02	13,52	5,4	$\Sigma = 100$

Повна ймовірність аварії $P(A) = 0,0184$ зменшилась в 3,67 рази в порівнянні з випадком, коли форма аварії F_1 не виключена ($P(A) = 0,0675$). Однак сумарний ризик збитків від аварії $R(D, A) = 0,12866$ млн. грн. при цьому зріс на

47%. Максимальний «вклад» в сумарний ризик аварії вніс сценарій аварії A_2 ($w_R(A_2)\% = 54,06\%$), значущість якого за ймовірністю $w_P(A_2)\%$ склала 75,6%.

Нехай тепер при оцінці сумарного ризику збитків від аварії в системі не враховується (ігнорується) найменш ймовірна (але з найбільшим збитком) форма аварії F_5 (значущість відповідного їй сценарію $w_P(A_5)\% = 0,21\%$). При тих же вихідних даних маємо повну ймовірність аварії $P(A) = 0,06654$, значення якої зменшилось в порівнянні з випадком, коли форма аварії F_5 враховувалась ($P(A) = 0,0675$), всього на 1,42%. Сумарний ризик збитків $R(D, A) = 0,08535$ млн. грн. (табл. 4.9) при цьому також очікувано зменшився (на 2,8%, див. табл. 4.7).

Таблиця 4.9

Результати розрахунку повного ризику збитків від аварії в системі за даними табл. 4.6 при ігноруванні форми аварії F_5

Характеристики аварійних подій	Сценарії аварії					Аварія A
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	
$P(A_i), P(A)$	0,0632	0,00253	0,00063	0,00016	0	0,06654
Ризики збитків, млн. грн.	0,0632	0,01264	0,00632	0,00316	0	0,08535
Значущість $w_R(A_i)\%$	74,08	14,81	7,41	3,7	0	$\Sigma = 100$

Отже неврахування (ігнорування) найменш ймовірної, хоча з найбільшим збитком, форми аварії F_5 в нашому випадку не призвело до суттєвого зниження сумарного ризику збитків від аварії в системі. Це означає, що раціональне обмеження множини модельних сценаріїв аварій, що враховуються при оцінці повного системного ризику, з ігноруванням малоїмовірних, хоча й обтяжених більшими збитками, аварійних подій є принципово можливим. При цьому допускається певне зниження сумарного ризику збитків від аварії, яке може виправдовуватися меншими затратами на проектування, будівництво та експлуатацію об'єкта тощо. Таким чином сценарний підхід з використанням байєсівського перетворення ймовірностей дозволяє не тільки формально здійснювати кількісне оцінювання ризиків аварій в складних системах з врахуванням індиві-

дуальних особливостей їх структури та функціонування, але і відбракувати аварійні події, що не є значущими за ймовірністю та ризиком. «Дефіцит» ризику, або величина його недо врахування в співставленні з варіантом розширення множини аварійних подій при цьому може порівнюватися з додатковими затратами, які слід понести, щоб цей ризик додатково врахувати й компенсувати. Це дозволить встановити ціну неврахованого ризику й ефективність додаткових затрат на його подолання.

Вернемось до табл. 4.8, в якій наведено результати оцінки сумарного ризику збитків від аварії при виключенні найбільш ймовірної форми аварії і відповідного їй сценарію, які обтяжені найменшими збитками. Аналіз показує, що в порівнянні з ситуацією, коли відповідна форма аварії не виключається (табл. 7), маємо зростання сумарного ризику збитків. Це означає, що використання лише імовірнісного критерію (4.1) може бути недостатнім для забезпечення належної надійності і безпеки такої складної інженерної системи як гідровузол, на якій можливі різні форми аварії, з різними ймовірностями та різними збитками. Зменшення ймовірності аварії на об'єкті за рахунок проектних, конструктивних чи експлуатаційних заходів не має бути самоціллю; воно має призводити і до зменшення ризику збитків від можливої аварії.

Традиційний підхід до забезпечення надійності і безпеки відповідальних об'єктів, зокрема гідроспоруд, передбачає їх розрахунки з врахуванням екстраординарних мало ймовірних подій (що рідко повторюються), які регламентуються нормативно-технічною документацією як розрахункові (або проектні). Передбачається, що при виникненні та по завершенні таких подій мають зберігатися всі задані параметри несучої здатності споруди, її конструкції, функціонування обладнання тощо в нормальному режимі без порушення вимог безпеки.

Основними імовірнісними характеристиками екстремальних подій є ймовірності їх виникнення (ймовірності перевищення) p або середні періоди повторення $T = p^{-1}$. Наприклад, згідно з чинними в Україні нормами [49] при проектуванні напірних гідроспоруд класу відповідальності СС3 ймовірність перевищення розрахункового паводку встановлюється рівною 10^{-3} , подій на рік

(0,1%, рік⁻¹), з середнім періодом повторення 1000 років. Тобто значення імовірнісних характеристик екстремальних, малоїмовірних подій, що можуть призводити до аварій, регламентуються відповідними нормативними документами в залежності від потенційних наслідків аварії на гідроспоруді або відмови системи. При цьому чим більшими прогнозуються потенційні наслідки аварії або відмови, тим меншою призначається нормативна (допустима) ймовірність виникнення малоїмовірної екстремальної події, за якої ці наслідки можуть реалізуватися. Так, при проектуванні гідроспоруд класу відповідальності СС2-1 ймовірність перевищення розрахункового паводку встановлюється вже рівною 10⁻² (1%), рік⁻¹, тобто на порядок меншою ніж для гідроспоруд класу СС3, для класу СС2-2 – 3·10⁻² (3%), рік⁻¹, СС1 – 5·10⁻² (5%), рік⁻¹.

Основною метою нормування ймовірностей виникнення екстремальних, малоїмовірних подій в залежності від потенційних наслідків є регламентація ймовірностей можливих аварій на гідровузлах та обмеження їх значеннями, що толерантно сприймаються суспільством згідно з критерієм (4.1). Такий підхід є загальноприйнятим в світі і реалізується практично в усіх небезпечних видах діяльності, галузях техніки та в технологіях [7, 18, 69, 77, 80, 84, 136, 149, 153].

Однак не можна виключати можливість невдалого вибору розрахункової екстремальної події серед малоїмовірних подій, які можуть призвести до аварії, і при виконанні критерію (4.1), якщо залишковий ризик збитків від аварії, яку можуть спричинити менш ймовірні події досягне свого максимуму.

Розглянемо кілька ілюстративних прикладів розв'язання задач оцінки залишкового ризику збитків від аварії внаслідок екстремальних малоїмовірних подій, що є незалежними і сумісними для двох характерних випадків:

1) добутки апріорних ймовірностей реалізації відповідних екстремальних подій $P(E_i)$ та збитків $D(A_i)$ від аварій, ними спричинених, є однаковими $P(E_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$ (див. нижче задачі 1÷4);

2) добутки $P(E_i) \cdot D(A_i)$ збільшуються зі зменшенням ймовірності екстремальної події (збитки нарастають з більшою інтенсивністю, ніж зменшується ймовірність події, що може їх спричинити) (задачі 5÷8).

Результати розрахунків для першого випадку ($P(E_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$) зведено в табл. 4.10÷4.13 і показано на рис. 4.4.

Таблиця 4.10

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок $P(E_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$, задача 1)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,00332	0,002	0,001428	0,00111	0,001
$D(A_i)$, млн. грн.	15	25	35	45	50
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,202297	0,18497	0,14629	0,099624	0,05

Таблиця 4.11

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок $P(E_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$, задача 2)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,05	0,01	0,005	0,0025	0,001
$D(A_i)$, млн. грн.	1	5	10	20	50
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,068158	0,12866	0,11175	0,08442	0,05

При розв'язанні кожної задачі оцінювалися залишкові сумарні ризики збитків, починаючи з події E_1 (у цьому випадку очікувані збитки $D(A_i) > 0$ для

всіх подій $E_1 \div E_5$, далі з події E_2 ($D(A_1) \approx 0$, $D(A_i) > 0$ для $E_2 \div E_5$), з події E_3 ($D(A_1) \approx 0$, $D(A_2) \approx 0$ і $D(A_i) > 0$ для $E_3 \div E_5$) і так далі.

При цьому припускалося, що всі екстраординарні події, які мають більшу ймовірність реалізації ніж подія, яка розглядається в якості розрахункової (проектної), вже не здатні викликати жодних збитків.

Таблиця 4.12

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок $P(E_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$, задача 3)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,5	0,05	0,01	0,005	0,002
$D(A_i)$, млн. грн.	0,1	1	5	10	25
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,05982	0,0842	0,11149	0,08436	0,05

Таблиця 4.13

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок $P(E_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$, задача 4)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,025	0,005	0,00332	0,002	0,001
$D(A_i)$, млн. грн.	2	10	15	25	50
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,104256	0,13876	0,124148	0,08994	0,05

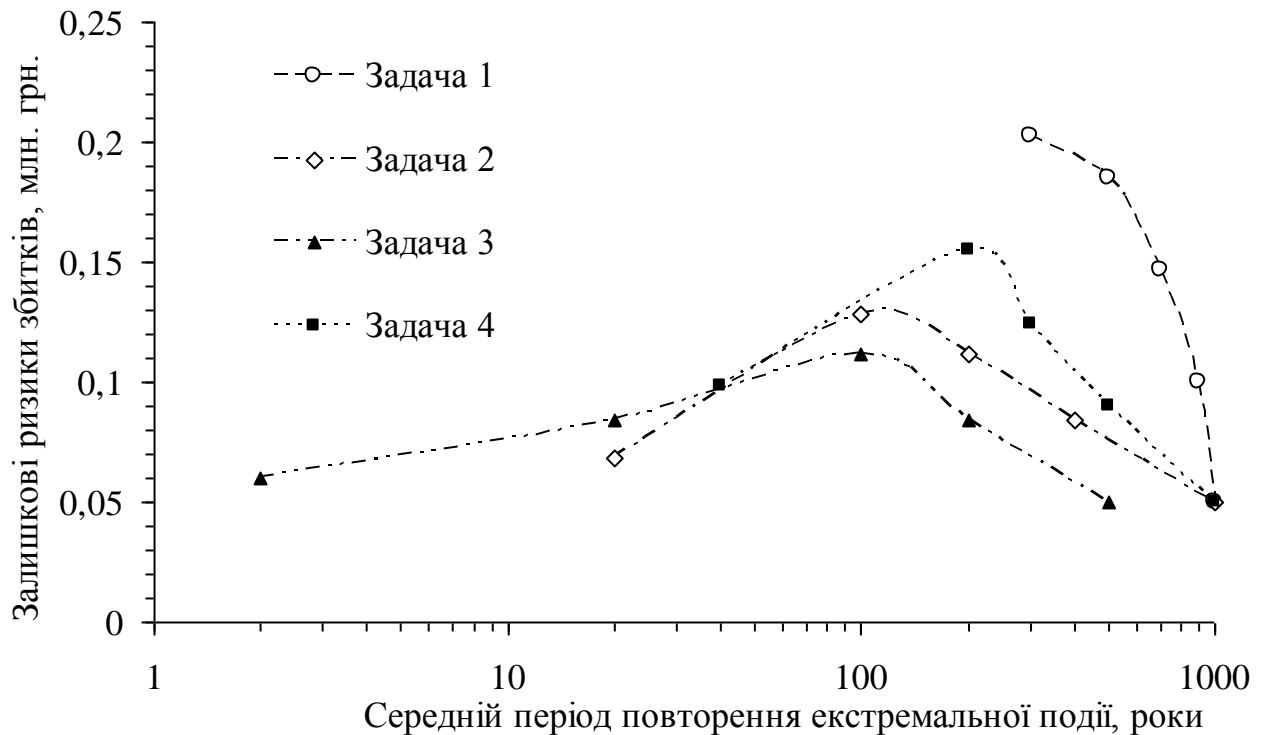


Рис. 4.4. Криві сумарних залишкових ризиків збитків

(випадок $P(E_i) \cdot D(A_i) = \text{const}$, задачі 1÷4)

Результати розрахунків для другого випадку, коли $P(E_i) \cdot D(A_i)$ зростають, зведено в табл. 4.14÷4.17 і показано на рис. 4.5.

Таблиця 4.14

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок 2, задача 5)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,00334	0,002	0,00143	0,00111	0,001
$D(A_i)$, млн. грн.	3,02	10	45,1	50	100
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,14907	0,19616	0,20979	0,15268	0,1

Таблиця 4.15

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок 2, задача 6)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,025	0,00668	0,00332	0,002	0,001
$D(A_i)$, млн. грн.	0,4	6	15	25	100
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,04846	0,13514	0,14383	0,11752	0,1

Таблиця 4.16

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок 2, задача 7)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,05	0,01	0,005	0,0025	0,001
$D(A_i)$, млн. грн.	0,2	3	10	24	100
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,03332	0,11128	0,13147	0,12060	0,1

Таблиця 4.17

Вихідні дані та результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків (випадок 2, задача 8)

Характеристики подій	Події E_i , що враховувалися при оцінці залишкового сумарного ризику збитків				
	$E_1 \div E_5$	$E_2 \div E_5$	$E_3 \div E_5$	$E_4 \div E_5$	E_5
$P(E_i)$, рік ⁻¹	0,5	0,05	0,01	0,005	0,002
$D(A_i)$, млн. грн.	0,02	0,6	5	15	50
Залишкові сумарні ризики збитків, млн. грн. · рік ⁻¹	0,01598	0,06472	0,1410	0,1386	0,1

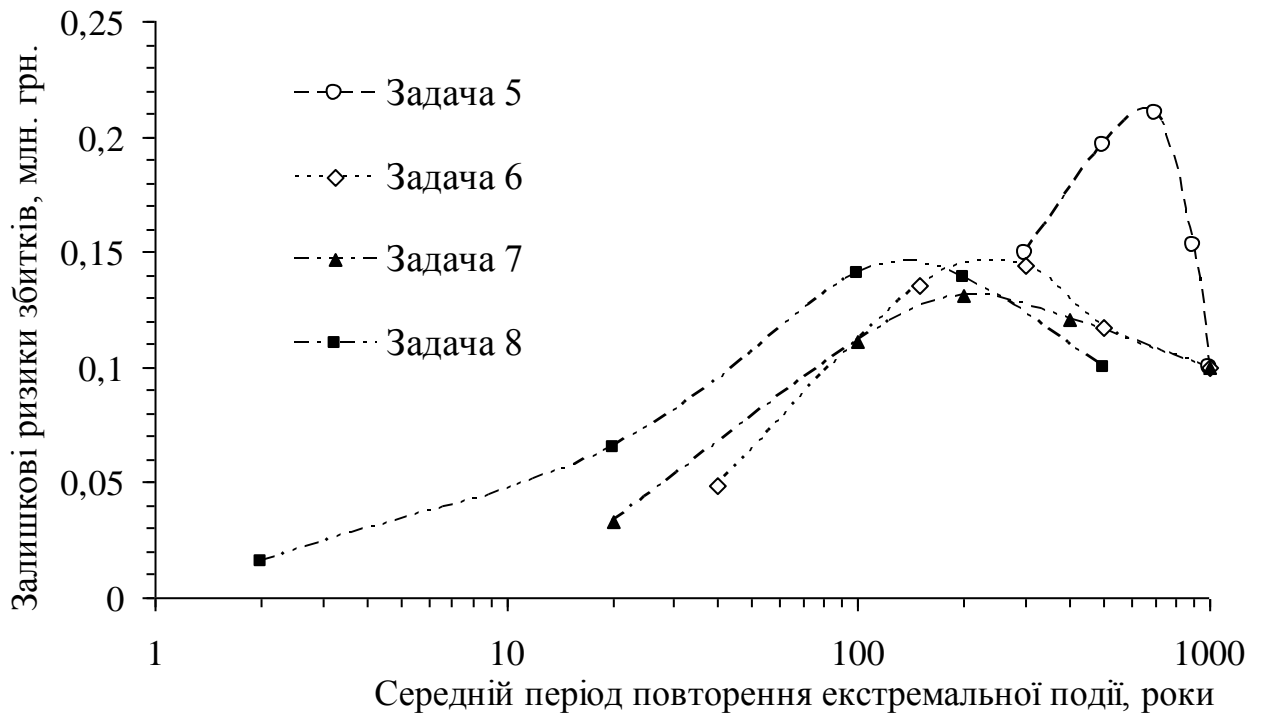


Рис. 4.5. Криві сумарних залишкових ризиків збитків
(випадок 2, задачі 5÷8)

Результати розрахунків залишкового ризику збитків при різних варіантах залежності збитків від ймовірності (середнього періоду повторення) екстремальних подій вказують на принципову можливість раціонального вибору розрахункової проектної події серед стохастично незалежних, сумісних екстремальних подій при проектуванні складної інженерної споруди чи технічної системи з врахуванням ризику. Показано, що сумарний залишковий ризик збитків від екстремальних, малоймовірних подій, на які споруда не розраховується, і які можуть спричинити аварію зі збитками, може досягати максимального значення за рахунок деякої «критичної» за ризиком екстремальної події. Використання цієї події в якості розрахункової проектної події, наслідки від якої мінімізуються за рахунок проектно-конструктивних та експлуатаційних заходів, направлених на забезпечення надійності і безпеки споруди, мінімізує залишковий ризик збитків.

Оцінка сумарного залишкового ризику в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей дозволяє ставити і вирішувати задачу вибору розрахункової проектної події і як задачу оптимізації.

При цьому величина, на яку зменшується сумарний залишковий ризик збитків від аварій при виборі кожної наступної з менш ймовірних екстремальних подій в якості розрахункової проектної події, може порівнюватися з додатковими затратами, які слід понести, щоб забезпечити це зменшення.

Приклад моделювання залишкового ризику збитків від сейсмічних впливів при виборі проектного землетрусу.

До класу розрахункових екстраординарних подій, на які розраховуються гідропороди, і збитки від яких мають мінімізуватися практично до нуля, відносяться і проектний землетрус.

Згідно з чинними в Україні нормами [58, 155] під проектним землетрусом (ПЗ) розглядають розрахунковий рівень сейсмічних впливів від землетрусів, що викликають на майданчику будівництва струси максимальною інтенсивністю за період від 500 до 1000 років. З іншого боку розрахунки гідропород на сейсмічні впливи передбачаються при інтенсивності сейсмічних впливів не менше 7 балів за шкалою MSK-64 [49, 155]. Однак необхідність врахування ризику збитків при виборі ПЗ в цілому для гідровузла з врахуванням землетрусів і меншої інтенсивності, що можуть повторюватися частіше, аніж рекомендують норми, можна обґрунтувати наявністю в складі сучасних гідровузлів великої кількості різного обладнання, устаткування, систем автоматизації тощо, відмови яких при землетрусах можуть провокувати розвиток системних аварій [130].

Слід зазначити, що в сейсмоактивному районі протягом служби гідровузла з різною ймовірністю можуть очікуватися землетруси зі струсами різної максимальної інтенсивності, з якими можуть пов'язуватися різні наслідки. При цьому, як показано в [155], між сейсмічною інтенсивністю I в балах шкали MSK-64 і максимальним прискоренням a_{\max} , що є основною розрахунковою характеристикою, яка характеризує рівень сейсмічної небезпеки, встановлюється складна імовірнісна залежність. Одні і ті ж сейсмічні прискорення a_{\max} , хоча і з різною ймовірністю, можуть прогнозуватися на значному діапазоні зміни інтенсивності сейсмічних струшувань.

Нижче представлено результати моделювання залишкового ризику збитків від сейсмічних впливів, де розглядалася група сейсмічних подій зі струшуваннями максимальною інтенсивністю за періоди: 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 і 5000 років. Оцінка ризику збитків здійснювалася для п'яти модельних залежностей очікуваних збитків від середнього періоду повторення сейсмічних подій. Дані для розрахунків наведено в табл. 4.18 та на рис. 4.6.

Таблиця 4.18

Дані для оцінки залишкового ризику збитків від землетрусів

Залежність	Очікувані збитки, млн. грн., при періодах повторення, роки								
	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000
1	50	100	250	500	1000	2500	5000	10000	25000
2	50	120	400	1000	2000	5000	10000	15000	25000
3	30	120	500	1300	2700	5000	8000	10000	12000
4	50	70	150	270	500	1300	3000	7000	25000
5	80	100	160	250	450	1000	2500	7000	35000

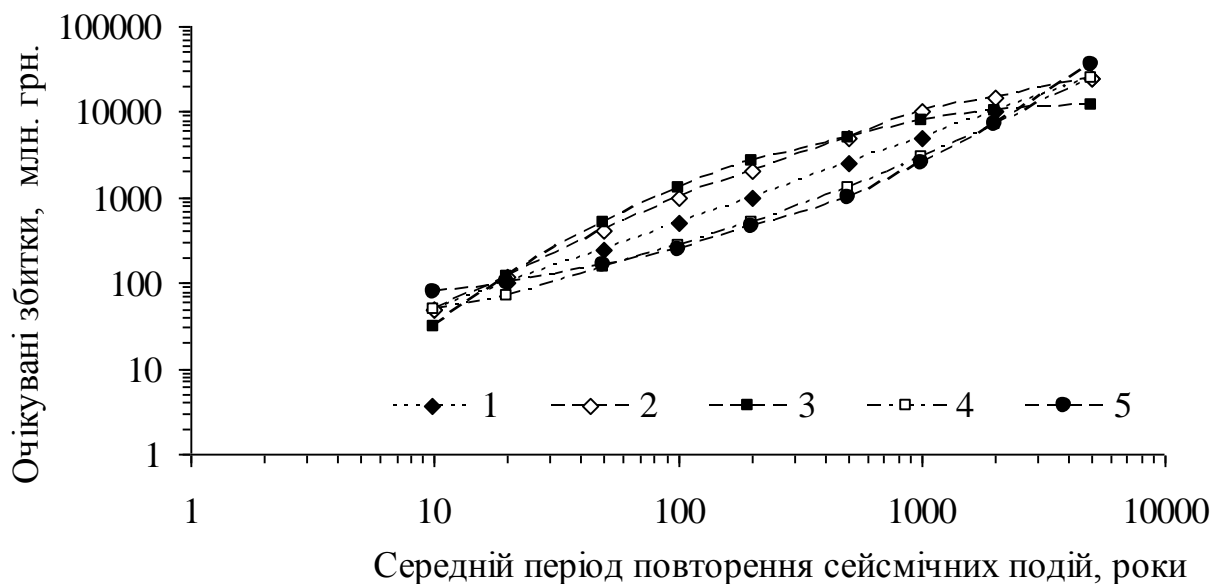


Рис. 4.6. Модельні залежності кривих зв'язку між очікуваними збитками та середнім періодом повторення землетрусів

Оцінка залишкового сумарного ризику збитків здійснювалася в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей згідно з наступним алгоритмом.

1. Встановлюється структурна функція сейсмостійкості $\Psi(\mathbf{S})$ (надійності, безпеки) гідровузла як системи, що відображає за ймовірністю злічену множину сумісних сейсмічних подій $\mathbf{E} = \{E_i\}$, $i = \overline{1, n}$, з відомими середніми періодами повторення $T(E_i)$, в злічену множину збитків $\mathbf{D} = \{D_i\}$, $i = \overline{1, n}$:

$$\Psi(\mathbf{S}) : \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{D}. \quad (4.12)$$

За функцією $\Psi(\mathbf{S})$ оцінюється повна ймовірність $P(D)$ виникнення збитку (будь-якого з можливих збитків внаслідок землетрусу) на множині \mathbf{D} .

2. Виникнення кожного зі збитків з множини \mathbf{D} представляємо у вигляді ідеалізованих, несумісних подій-наслідків D_i , $i = \overline{1, n}$, виникнення яких пов'язуємо із відповідними сейсмічними подіями $E_i \in \mathbf{E}$, $i = \overline{1, n}$, структурними функціями $\Psi(S_i)$ сейсмостійкості (надійності, безпеки) гідроспороди:

$$\Psi(S_i) : E_i \rightarrow D_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.13)$$

За функціями $\Psi(S_i)$ оцінюються апріорні ймовірності виникнення кожного з очікуваних збитків D_i , $i = \overline{1, n}$, на множині \mathbf{D} .

3. Оцінюється умовна (байєсівська) ймовірність $P(D_i | D)$ реалізації збитку D_i за умови, що відбувається будь-який землетрус $E_i \in \mathbf{E}$, $i = \overline{k, n}$, який може викликати збитки:

$$P(D_i | D) = \hat{P}(D_i) \cdot P(D | D_i) / \sum_{i=k}^n \hat{P}(D_i) \cdot P(D | D_i), \quad (4.14)$$

де k – індекс, що присвоюється кожній наступній сейсмічній події, що за інтенсивністю перевищує рівень землетрусу, при якому збитки виключаються (рівень ПЗ) $\hat{P}(D_i)$ – апіорна ймовірність виникнення збитку D_i , яка визначається за структурною функцією $\Psi(S_i)$; $P(D | D_i)$ – умовна ймовірність виникнення збитку D_i на визначеній множині збитків \mathbf{D} , яка представляється нормалізованою «вагою» апіорної ймовірності $\hat{P}(D_i)$ в системі відповідних ймовірностей виникнення збитків $D_i \in \mathbf{D}$:

$$P(D | D_i) = \hat{P}(D_i) / \sum_{i=k}^n \hat{P}(D_i). \quad (4.15)$$

4. Визначається безумовна ймовірність збитку D_i :

$$P(D_i) = P(D) \cdot P(D_i | D). \quad (4.16)$$

5. Оцінюється сумарний залишковий ризик збитків від кількох сейсмічних подій, що враховуються:

$$R(D) = \sum_{i=k}^n P(D_i) \cdot D_i, \quad (4.17)$$

де $R(D)$ – сумарний ризик збитків; $P(D_i)$ – повна (безумовна апістеріорна) ймовірність виникнення збитку D_i .

При чисельному моделюванні залишкових сумарних ризиків збитків апіорні ймовірності виникнення збитків в результаті окремих землетрусів, з запасом ризику, прирівнювалися до ймовірностей виникнення відповідних сейсмічних подій E_i : $P(E_i) = 1/T(E_i)$, де $T(E_i)$ – середній період повторення сейсмічної події E_i . Повна ймовірність виникнення будь-якого збитку D внаслідок

землетрусів, що за інтенсивністю можуть перевищити рівень землетрусу, при якому збитки виключаються (рівень ПЗ), оцінювалася за формулою:

$$P(D) = 1 - \prod_{i=k}^n [1 - P(E_i)], \quad (4.18)$$

де k – індекс, що присвоюється кожній наступній сейсмічній події, що за інтенсивністю перевищує рівень ПЗ.

Результати чисельного моделювання у вигляді кривих залишкового ризику збитків в залежності від періоду повторення землетрусів, що можуть перевищити рівень землетрусу, при якому збитки виключаються проектними рішеннями (рівень ПЗ), представлено на рис. 4.7.

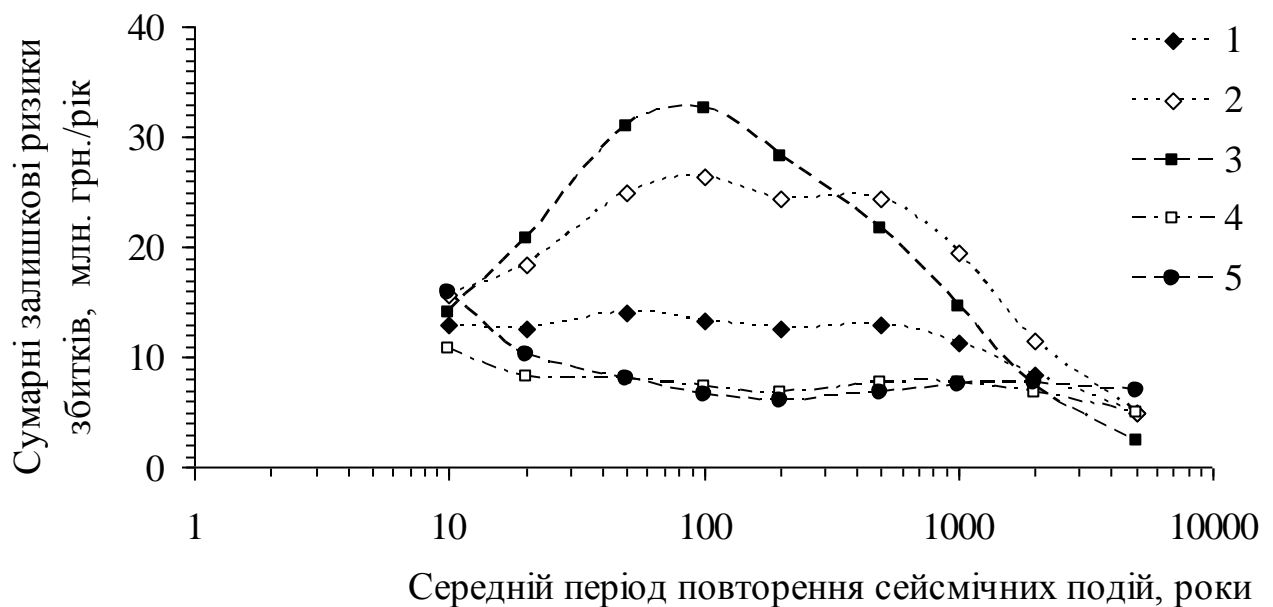


Рис. 4.7. Криві сумарних залишкових ризиків збитків від землетрусів, що перевищують рівень ПЗ

(за результатами моделювання згідно з даними табл. 4.18)

Результати проведеного нами чисельного моделювання сумарних залишкових ризиків збитків показують, що вибір проектного землетрусу (ПЗ) в знач-

ній мірі може обумовлюватися характером зв'язку між очікуваними збитками та періодом повторення сейсмічних подій.

Зокрема, залежність 3 між очікуваними збитками та середнім періодом повторення сейсмічних подій (див. рис 4.6) може розглядатися як одна з найбільш типових при моделюванні економічних збитків і, відповідно, при оцінці економічних ризиків в різних галузях господарської сфери. В цьому випадку маємо один чіткий максимум на кривій сумарного залишкового ризику збитків, якщо в якості розрахункового (проектного) землетрусу (ПЗ) не буде вибрана сейсмічна подія з середнім періодом повторення 100 років. Подібна ситуація може бути характерною для гідроспоруд, вихід з ладу яких або аварії на яких можуть викликати переважно економічні збитки для їх власників, наприклад, для споруд класу СС1 (найнижчого класу), нормативні вимоги до стійкості, міцності і довговічності яких, відповідно, є найнижчими.

Для гідроспоруд класу СС2-2 нормативні вимоги до стійкості і міцності вищі. Відповідно такі споруди є більш відмовостійкими і мають більшу живучість, ніж споруди класу СС-1. Очікувані збитки від виходу з ладу цих споруд та аварій на них при сейсмічних подіях краще описуються залежністю 2. Окрім розрахунків таких гідроспоруд на дію проектного землетрусу, при якому не допускається відмова (вихід з ладу) споруди, тобто споруда має під час сейсмічної події і після неї експлуатуватися і функціонувати безвідмовно, слід передбачити розрахунки і на дію максимального проектного землетрусу (МПЗ), який гідроспоруда має витримати без руйнувань (прориву напірного фронту тощо). В нашому випадку (див. залежність 2, рис. 4.6, 4.7), це, наприклад, сейсмічна подія з середнім періодом повторення 1000 років.

Для гідроспоруд найвищих класів (СС2-1, СС-3) зв'язок між очікуваними збитками та періодом повторення сейсмічних подій може описуватися залежностями 1 та 4 (інколи і 5). При цьому розрахунки гідроспоруд можуть проводитися як на дію ПЗ і МПЗ, так і лише МПЗ. При цьому середній період повторення МПЗ може прийматися рівним 5000÷10000 років.

Оцінка сейсмічного ризику в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей дозволяє проконтролювати залишковий ризик збитків та виявити значущі за ризиком сейсмічні події, які можуть бути рекомендовані як в якості ПЗ, так і МПЗ. Це, в свою чергу, уможливило формалізацію процесу вибору проектних землетрусів з врахуванням ризику.

4.4. Задача про оптимізацію складу зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв при заданому рівні її надійності

В деяких практичних випадках задача оптимізації складу системи може бути зведена до встановлення оптимального співвідношення вартості та надійності її окремих структурних одиниць [67, 127].

Нехай надійність зарезервованої системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$ у складі основної підсистеми s_1 , підсистеми, що перебуває в резерві s_2 , та автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$ (див. § 3.1) забезпечується, якщо дотримується умова:

$$P(\mathbf{S}_{2,a}^r) \leq P_0, \quad (4.19)$$

де P_0 – гранично допустима ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$.

Або, з врахуванням рішення (3.12),

$$P(s_1) \cdot \left[P(s_2) + \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})} (1 - P(s_2)) \right] \leq P_0. \quad (4.20)$$

Розглянемо задачу оптимізації з використанням метода Лагранжа [15, 67, 127], коли треба мінімізувати сукупні затрати на систему $\mathbf{S}_{2,a}^r$:

$$C(\mathbf{S}_{2,a}^r) = C(s_1) + C(s_2) + C(a_{1,2}) \rightarrow \min, \quad (4.21)$$

при обмеженні (4.20), де $C(s_1)$, $C(s_2)$, $C(a_{1,2})$ – вартості відповідних підсистем s_1 , s_2 та автоматичного перемикача на резерв $a_{1,2}$.

Перепишемо умову (4.20) у вигляді:

$$\begin{aligned} P^2(s_1) \cdot P(s_2) + P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(a_{1,2}) + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - \\ - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) \cdot P(s_2) - P_0 \cdot (P(s_1) + P(a_{1,2})) = 0. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Функція Лагранжа для задачі (4.21) отримає вигляд:

$$\begin{aligned} L(P(s_1), P(s_2), P(a_{1,2}), \lambda) = C(s_1) + C(s_2) + C(a_{1,2}) + \\ + \lambda \cdot [P^2(s_1) \cdot P(s_2) + P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(a_{1,2}) + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - \\ - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) \cdot P(s_2) - P_0 \cdot (P(s_1) + P(a_{1,2}))], \end{aligned} \quad (4.23)$$

Для того щоб знайти локально оптимальні рішення, диференціюємо функцію Лагранжа (4.23) за відповідними змінними $P(s_1)$, $P(s_2)$, $P(a_{1,2})$, λ , та прирівнюємо похідні до нуля. Маємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P(s_1)} = \frac{\partial C(s_1)}{\partial P(s_1)} + \lambda \cdot [2P(s_2) \cdot P(s_1) + P(s_2) \cdot P(a_{1,2}) + P^2(a_{1,2}) - \\ - P^2(a_{1,2}) \cdot P(s_2) - P_0] = 0; \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P(s_2)} = \frac{\partial C(s_2)}{\partial P(s_2)} + \lambda \cdot [P^2(s_1) + P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2})] = 0; \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P(a_{1,2})} = \frac{\partial C(a_{1,2})}{\partial P(a_{1,2})} + \lambda \cdot [P(s_1) \cdot P(s_2) + 2 \cdot P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) -$$

$$-2 \cdot P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(a_{1,2}) - P_0] = 0; \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \lambda} = & P^2(s_1) \cdot P(s_2) + P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(a_{1,2}) + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - \\ & - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) \cdot P(s_2) - P_0 \cdot (P(s_1) + P(a_{1,2})) = 0. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Розв'язок системи з чотирьох рівнянь (4.24)÷(4.27) з чотирма невідомими $P(s_1)$, $P(s_2)$, $P(a_{1,2})$, λ дає всі локальні оптимуми.

Для того щоб знайти глобальний оптимум, дослідимо структуру поставленої задачі оптимізації. Запишемо функцію обмежень

$$\begin{aligned} g(P(s_1), P(s_2), P(a_{1,2})) = & P^2(s_1) \cdot P(s_2) + P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(a_{1,2}) + \\ & + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - P_0 \cdot (P(s_1) + P(a_{1,2})) - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) \cdot P(s_2). \end{aligned} \quad (4.28)$$

Розглянемо матрицю Гессе для функції (4.28):

$$\begin{bmatrix} 2P(s_2) & 2P(s_1) + P(a_{1,2}) - & P(s_2) + 2P(a_{1,2}) - \\ & - P^2(a_{1,2}) & - 2P(a_{1,2}) \cdot P(s_2) \\ 2P(s_1) + P(a_{1,2}) - & 0 & P(s_1) - 2P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) \\ - P^2(a_{1,2}) & & \\ P(s_2) + 2P(a_{1,2}) - & P(s_1) - 2P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) & 2P(s_1) \cdot (1 - P(s_2)) \\ - 2P(a_{1,2}) \cdot P(s_2) & & \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

У випадках, коли матриця Гессен (4.29) для функції (4.28) виявиться невід'ємною, тобто функція обмежень (4.28) буде випуклою, і якщо і функції вартостей $C(s_1)$, $C(s_2)$, $C(a_{1,2})$ будуть випуклими, то рівняння (4.24)÷(4.27) визначатимуть задачу випуклого програмування, в якій будь-який локальний оптимум буде і глобальним.

Пошук оптимального рішення дещо спрощується, якщо одна зі складових частин системи $\mathbf{S}_{2,a}^r$ вважається заданою, і склад системи поповнюється лише двома складовими. Такий випадок можна вважати класичним прикладом підвищення надійності системи за рахунок резервування.

Розглянемо наступну задачу. Нехай насосний агрегат s , ймовірність відмови якого $P(s) > P_0$, підлягає резервуванню. При цьому створюється система $\mathbf{S}_{2,a}^r$ з автоматичним перемиканням на резерв, ймовірність відмови якої має бути не більшою за P_0 . Нехай підбираються основна підсистема (s_1) та автоматичний перемикач на резерв ($a_{1,2}$), а функції резерву (s_2) передаються s .

Отримуємо задачу оптимізації, коли треба мінімізувати сукупні затрати

$$C(\mathbf{S}_{2,a}^r) = C(s_1) + C(a_{1,2}) \rightarrow \min, \quad (4.30)$$

при обмеженні

$$P(s_1) \cdot \left[P(s) + \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})} (1 - P(s)) \right] \leq P_0. \quad (4.31)$$

Функція Лагранжа для задачі (4.30) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} L(P(s_1), P(a_{1,2}), \lambda) = & C(s_1) + C(a_{1,2}) + \\ & + \lambda \cdot \left[P^2(s_1) \cdot P(s) + P(s_1) \cdot P(s) \cdot P(a_{1,2}) + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - \right. \\ & \left. - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) \cdot P(s) - P_0 \cdot (P(s_1) + P(a_{1,2})) \right]. \end{aligned} \quad (4.32)$$

Отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P(s_1)} = \frac{\partial C(s_1)}{\partial P(s_1)} + \lambda \cdot \left[2P(s) \cdot P(s_1) + P(s) \cdot P(a_{1,2}) + P^2(a_{1,2}) - \right. \\ \left. - P^2(a_{1,2}) \cdot P(s) - P_0 \right] = 0, \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P(a_{1,2})} = \frac{\partial C(a_{1,2})}{\partial P(a_{1,2})} + \lambda \cdot [P(s_1) \cdot P(s) + 2 \cdot P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) - 2 \cdot P(s_1) \cdot P(s) \cdot P(a_{1,2}) - P_0] = 0, \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = P^2(s_1) \cdot P(s) + P(s_1) \cdot P(s) \cdot P(a_{1,2}) + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) \cdot P(s) - P_0 \cdot (P(s_1) + P(a_{1,2})) = 0. \quad (4.35)$$

Розв'язок системи з трьох рівнянь (4.33)÷(4.35) з трьома невідомими $P(s_1)$, $P(a_{1,2})$, λ дає всі локальні оптимуми.

Розглянемо матрицю Гессе для функції обмежень

$$g(P(s_1), P(a_{1,2})) = P^2(s_1) \cdot P(s) + P(s_1) \cdot P(s) \cdot P(a_{1,2}) + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - P_0 \cdot (P(s_1) + P(a_{1,2})) - P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) \cdot P(s). \quad (4.36)$$

Отримуємо:

$$\begin{bmatrix} 2P(s) & P(s) + 2P(a_{1,2}) - 2P(a_{1,2}) \cdot P(s) \\ P(s) + 2P(a_{1,2}) - 2P(a_{1,2}) \cdot P(s) & 2P(s_1) \cdot (1 - P(s)) \end{bmatrix}. \quad (4.37)$$

У випадках, коли матриця Гессе (4.37) для функції (4.36) виявиться невід'ємною, тобто функція обмежень (4.36) буде випуклою, і якщо і функції відповідних вартостей $C(s_1)$, $C(a_{1,2})$ будуть випуклими, то рівняння (4.33)÷(4.35) визначатимуть задачу випуклого програмування, в якій будь-який локальний оптимум буде і глобальним.

Розглянемо ілюстративний приклад при $P_0 = 10^{-6}$, 1/годину, $P(s) = 0,00095$ 1/годину. Вибір здійснюватимемо з варіантів, наведених в табл. 4.19.

Таблиця 4.19

Розрахункові характеристики варіантів основної підсистеми та автоматичного перемикача на резерв

Основна підсистема			Автоматичний перемикач на резерв		
Варіанти	$P(s_1)$, година ⁻¹	$C(s_1)$, млн. грн.	Варіанти	$P(a_{1,2})$, година ⁻¹	$C(a_{1,2})$, млн. грн.
1	0,005	1	1	0,004	0,1
2	0,002	1,3	2	0,002	0,2
3	0,001	1,8	3	0,001	0,3
4	0,0005	2,7	4	0,0004	0,6
5	0,0002	4,4	5	0,0002	1
6	0,0001	6,2	6	0,0001	1,7
7	0,00005	9,7	7	0,00002	5,5
8	0,00002	15,6	–	–	–
9	0,00001	20,5	–	–	–

Дискретні значення вартостей основної підсистеми та автоматичного перемикача на резерв (табл. 4.19) апроксимуємо монотонними степеневими функціями ймовірностей відмов:

$$C(s_1) = 0,0572 \cdot P(s_1)^{-0,5126}; \quad C(a_{1,2}) = 0,0018 \cdot P(a_{1,2})^{-0,7442}. \quad (4.38)$$

Легко показати, що функції вартостей (4.38) є випуклими, оскільки вони мають додатну другу похідну.

В результаті досліджень матриці Гессе було встановлено наступне: при $P(a_{1,2}) = 0,004$, година⁻¹, $P(a_{1,2}) = 0,002$, година⁻¹, та при $P(a_{1,2}) = 0,001$, година⁻¹, функція (4.36) не буде випуклою; при $P(a_{1,2}) = 0,0004$, година⁻¹, функція (4.36) буде випуклою для всіх $P(s_1) \geq 0,001$, година⁻¹; при $P(a_{1,2}) = 0,0002$, година⁻¹, функція (4.36) буде випуклою для всіх $P(s_1) \geq 0,0005$, година⁻¹; нарешті

при $P(a_{1,2}) = 0,0001$, година⁻¹, функція (4.36) буде випуклою для всіх $P(s_1) \geq 0,0005$, година⁻¹.

При вартостях (4.38) та при $P_0 = 10^{-6}$, година⁻¹, $P(s) = 0,00095$, година⁻¹, з (4.33)÷(4.35) отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} -0,08652P^{-1,5126}(s_1) + \lambda \cdot (0,0019P(s_1) + 0,00095P(s_1) + P^2(a_{1,2}) - \\ - 0,00095P^2(a_{1,2}) - 0,000001) = 0 \\ -0,00314P^{-1,7442}(a_{1,2}) + \lambda \cdot (0,00095 + 2P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) - \\ - 0,0019P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) - 0,000001) = 0 \\ 0,00095P^2(s_1) + 0,00095P(s_1) \cdot P(a_{1,2}) + P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - \\ - 0,00095P(s_1) \cdot P^2(a_{1,2}) - 0,000001P(s_1) - 0,000001P(a_{1,2}) = 0 \end{cases} \quad (4.39)$$

Розв'язавши систему (4.39), отримуємо оптимальні значення ймовірностей, відповідно, відмови основної підсистеми $P(s_1) \approx 0,001$, година⁻¹, відмови автоматичного перемикача на резерв $P(a_{1,2}) \approx 0,00025$, година⁻¹. Приймаємо $P(s_1) = 0,001$, година⁻¹, $P(a_{1,2}) = 0,0002$, година⁻¹. Сукупні затрати на систему при цьому складуть $C(\mathbf{S}_{2,a}^r) = 2,99$ млн. грн. Оскільки при $P(a_{1,2}) = 0,0002$, година⁻¹, функція (4.36) буде випуклою, якщо $P(s_1) \geq 0,0005$, година⁻¹, то рішення з $P(s_1) = 0,001$, година⁻¹, та $P(a_{1,2}) = 0,0002$, година⁻¹, дає глобальний оптимум при $P(\mathbf{S}_{2,a}^r) = 9,83 \cdot 10^{-7}$, година⁻¹, що менше $P_0 = 10^{-6}$, година⁻¹.

Таким чином оптимізація на основі методу Лагранжа дозволяє здійснити вибір оптимального складу зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв, при якому задана надійність системи забезпечується при мінімальних сукупних затратах. При цьому може досягатися оптимальне співвідношення вартості та надійності структурних одиниць системи: основної підсистеми; підсистеми, що перебуває в резерві; автоматичного перемикача на резерв.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Виділено загальні принципи та сформульовано першочергові задачі управління безпекою гідровузлів з врахуванням ризиків аварій. В якості основного принципу управління безпекою гідровузлів з врахуванням ризику аварій прийнято принцип розумно досяжного низького рівня ризику. Серед першочергових задач, які мають вирішуватися при управлінні безпекою гідровузлів з врахуванням ризику, виділено задачі: ранжирування аварійних подій на гідровузлі за значущістю; обґрунтування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлах та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності; оптимізації показників надійності засобів автоматичного контролю і регулювання безпеки, що встановлюються на гідровузлах.

2. Розроблено метод оцінки значущості аварійних подій за Фусселем – Веслі за ймовірністю та ризиком збитків в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей. Розглянуто приклад оцінки значущості базових аварійних подій за ймовірністю, що можуть призвести до аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС.

3. Показано можливість обґрунтування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлах та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності в рамках сценарного підходу до оцінки ризиків збитків з використанням байєсівського перетворення ймовірностей. Розглянуто приклад чисельного моделювання залишкового ризику збитків від сейсмічних впливів при виборі проектного землетрусу.

4. Використано метод Лагранжа для розв'язання задачі оптимізації складу зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв при заданому рівні її надійності.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [117, 122-124, 127, 128-131, 149, 153, 166, 229].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо розробки методів для імовірнісного прогнозування аварій, кількісної оцінки ризиків аварій та управління надійністю і безпекою гідровузлів як складних систем з врахуванням ризику в рамках сценарного підходу на основі байєсівських процедур перетворення ймовірностей.

В процесі виконання роботи отримано такі основні результати:

1. Виконано аналіз сучасних підходів, методів та моделей для імовірнісного прогнозування аварій, оцінки безпеки та управління безпекою гідровузлів в рамках ризик-орієнтованого напрямку досліджень в області техногенної безпеки з врахуванням особливостей гідровузлів як складних синергетичних систем. Встановлено, що задачі прогнозування аварій на гідровузлах є складними системними задачами, обтяженими як параметричною, так і структурною невизначеністю факторів. Показано, що вирішення проблем імовірнісного прогнозування аварій та кількісної оцінки ризику аварій на гідровузлах з врахуванням різних факторів, як природних, так і техногенних, можливе в рамках сценарного підходу. Сценарне моделювання дозволяє поєднати можливості різних методів та моделей, здійснити синтез оцінок ймовірностей аварій та ризиків аварій, отриманих за допомогою різних методів за окремими сценаріями.

2. Отримав подальший розвиток сценарний підхід до оцінки ймовірностей аварій та оцінки ризиків аварій на гідровузлах в контексті використання байєсівського перетворення ймовірностей, що дозволило розв'язувати задачу кількісної оцінки сумарного ризику збитків від аварії на гідровузлі від різних модельних сценаріїв, що розглядаються як несумісні аварійні події-припущення. Вперше сформульовано положення про несумісність модельних сценаріїв аварій. Доведено, що аварія на гідровузлі може виникнути з будь-якої з довільних аварійних подій-причин, може відбутися в різних формах або видах, але розвиватиметься лише за одним зі встановлених у вигляді ідеалізова-

них подій-припущень сценаріїв. При цьому повний (сумарний) ризик збитків від аварії має встановлюватися з врахуванням різних несумісних сценаріїв її реалізації, а повна ймовірність аварії – з врахуванням всіх довільних аварійних подій-причин, в тому числі і сумісних.

3. Вперше застосовано метод Байєса до імовірнісного прогнозування нетипових сценаріїв системних аварій на гідровузлах, пов'язаних з відмовами автоматичних засобів регулювання. Розв'язано задачу оцінки ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та задачу оцінки ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження. За результатами імітаційного моделювання сценарію розвитку аварії на гідроагрегаті №2 Саяно-Шушенської ГЕС, що відбулася в 2009 р., та сценарію виникнення аварії на верховому басейні ГАЕС Таум Саук, що сталася в 2005 р., з врахуванням відмови автоматичних засобів регулювання, встановлено, що існує деяка критична межа для ймовірності відмови автоматичних засобів, що використовуються на гідровузлах, яка може оцінюватися величиною 10^{-2} , рік⁻¹, перевищення якої призводить до зростання ймовірності аварії в системі в цілому.

4. Проаналізовано особливості аварійності гідровузлів у складі каскадів з врахуванням можливості поширення гідродинамічної аварії на каскад. Вперше розглянуто задачі оцінки ймовірностей різних сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскадах гідропоруд та отримано практичні рішення з імовірнісного прогнозування таких аварій.

5. Отримав подальший розвиток метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням з використанням байєсівського перетворення ймовірностей та вперше розроблено метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускною здатністю як неоднорідної системи з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів в рамках байєсівського підходу.

6. Вперше в рамках сценарного підходу до оцінки ймовірностей аварій і ризику аварій з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розроблено метод оцінки значущості за Фусселем – Веслі аварійних подій на гідро-

вузлі з метою їх ранжирування за пріоритетом безпеки. Встановлено, що ранжирування аварійних подій за значущістю в рамках сценарного підходу до оцінки ймовірностей аварій і ризику збитків від аварій з використанням байєсівського перетворення ймовірностей дозволяє виявити найбільш ймовірні сценарії аварій і сценарії аварій, обтяжені найбільшими ризиками, ідентифікувати пріоритетні чинники аварійності, які визначають безпеку гідровузла.

6. Вперше в рамках сценарного підходу до оцінки ризиків збитків з використанням байєсівського перетворення ймовірностей розроблено метод обґрунтування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлі та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику. Встановлено, що «внески» різних сценаріїв аварій на гідропорудах в загальний (сумарний) ризик збитків аварії на гідровузлі та «внески» окремих базових аварійних-подій причин у повну ймовірність аварії, і, відповідно, в сумарний ризик збитків аварії на гідропоруді можуть суттєво розрізнятися. При цьому обтяжені великими збитками але малоймовірні сценарії і відповідні їм форми аварій можуть давати незначний «вклад» в сумарний ризик збитків від аварії, і ними, при відповідному обґрунтуванні, можна нехтувати. При нехтуванні аварійними подіями, які обтяжені незначними збитками, але часто повторюються, залишковий сумарний ризик збитків від системних аварій, які відбуваються за різними сценаріями, може зростати і сягати максимуму. Такі аварійні події слід визначати як проектні, при яких має забезпечуватися збереження всіх заданих параметрів несучої здатності гідропоруди, її конструкції, функціонування системи, обладнання тощо в нормальному режимі без порушення вимог безпеки.

Розроблені методи було реалізовано і апробовано при розв'язанні науково-практичних задач, що підтверджено відповідними актами впровадження від Національного університету водного господарства та природокористування та ПАТ «Укргідропроєкт».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аварии и повреждения больших плотин/ Н.С. Розанов, А.И. Царев и др. [Под ред. А.А. Борового]. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 126 с.
2. Акимов В.А. Надежность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин и др. – М.: Деловой экспресс, 2002. – 368 с.
3. Акимов В.А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
4. Аугусти Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати [Пер. с англ. Ю.Д. Сухова]. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
5. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен // Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
6. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан // Пер. с англ. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
7. Бегун В.В. Вероятностный анализ безопасности атомных станций / В. В. Бегун, О. В. Горбунов, И. Н. Каденко и др. – К. : Випол, 2000. – 558 с.
8. Бегун В.В. Задача определения текущего риска объекта повышенной опасности / В.В. Бегун // Математичні машини і системи. – 2011. – № 1. – С. 120-126.
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. Бегун В.В. Моніторинг безпеки на основі аналізу ймовірнісних структурно-логічних моделей виробництва / В.В. Бегун // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова, 2009. – Вип. 52. – С. 17-26.
11. Бегун В.В. Щодо питань про сучасні методи регулювання безпеки / В.В. Бегун, В.Ф. Гречанінов, В.П. Клименко // Математичні машини і системи. – 2013. – №4. – С.135-146.

12. Бейко І.В. Задачі, методи і алгоритми оптимізації: навчальний посібник / І.В. Бейко, П.М. Зінько, О.Г. Наконечний. – Рівне: НУВГП, 2011. – 624 с.
13. Беллендир Е.Н. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е.Н. Беллендир, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин и др. – СПб.: В 2-х томах. Т. 1, 2. Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. – 553 с. – 524 с.
14. Бернстайн П. Против богов: Укрощение риска / П. Бернстайн // Пер. с англ. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2000. – 400 с.
15. Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа / Д. Бертсекас // Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 400 с.
16. Бессонов А.А. Надежность систем автоматического регулирования / А.А. Бессонов, А.В. Мороз. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
17. Биченок М.М. Основи інформатизації управління регіональною безпекою / М.М. Биченок // РНБО України; Інститут проблем національної безпеки. – К.: Інститут проблем національної безпеки, 2005. – 193 с.
18. Биченок М.М. Ризики життєдіяльності у природно-техногенному середовищі / М.М. Биченок, С.П. Иванюта, Є.О. Яковлев. – К.: Інститут проблем національної безпеки. – 2008. – 160 с.
19. Бідюк П.І. Аналіз даних з використанням байєсівських моделей / П.І. Бідюк, Є.О. Демківський, О.П. Бідюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – №1. – С. 40-54.
20. Бідюк П.І. Байєсівські мережі в технологіях інтелектуального аналізу даних / П.І. Бідюк, О.М. Терентьев, М.М. Коновалюк // Комп'ютерні технології. Наукові праці. – Вип. 121. – Том 134. – 2010. – С. 6-16.
21. Бідюк П.І. Дослідження сталого розвитку макроекономічних процесів в Україні / П.І. Бідюк, В.Я. Данилов, Йошіо Мацуокі // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – №3. – С. 84-97.
22. Бідюк П.І. Основні етапи побудови і приклади застосування мереж Байєса / П.І. Бідюк, Н.В. Кузнецова // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2007. – №4. – С. 26-39.

23. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
24. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций/ В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
25. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. – Красноярск: Сибирский изд. дом «Суриков», 1999. – 562 с.
26. Бурцев А.А. Оценка рисков аварийных ситуаций на гидроэлектростанциях Красноярского края / А.А. Бурцев, В.В. Ничепорчук, К.В. Симонов // Jour. of Siberian Federal University. Eng. & Technologies. – 2008. – № 2. – С. 207-218.
27. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы / А.И. Вайнберг. – Харьков: Тяжпромавтоматика, 2008. – 304 с.
28. 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.
29. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
30. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
31. Вітлінський В.В. Економічний ризик: ігрові моделі / В.В. Вітлінський, П.І. Верченко та ін. – К.: КНЕУ, 2002. – 446 с.
32. Вишняков Я.Д. Общая теория рисков / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. – М.: Академия, 2008. – 368 с.
33. Водосбросы большой пропускной способности / Л.П. Михайлов, М.Ф. Складнев и др. [Под ред. А.А. Борового]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. –144 с.
34. Гарантийный надзор за сложными техническими системами / Г.Е. Алпаидзе, Л.Г. Романов и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 232 с.
35. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.

36. Гидроэнергетика и окружающая среда / [Под общ. ред. Ю. Ландау и Л.А. Сиренко]. – К.: Либра, 2004. – 484 с.
37. Глазунов Л.П. Основы надежности автоматических систем управления / Л.П. Глазунов, В.П. Грабовецкий, О.В. Щербаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
38. Гогоберидзе М.И. Риск повреждения и разрушения грунтовых плотин / М.И. Гогоберидзе, Ю.Н. Микашвили и др. // Гидротехническое строительство. – 1984. – №4. – С. 35-38.
39. Горбулін В.П. Системно-концептуальні засади національної безпеки України / В.П. Горбулін, А.Б. Качинський. – К.: ДП «НВЦ» «Євроатлантикінформ», 2007. – 592 с.
40. Гроп Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
41. Гузенков С.Н. Надежность хвостовых хозяйств обогатительных фабрик / С.Н. Гузенков, Д.В. Стефанишин и др. – Белгород: «Везелица», 2007. – 674 с.
42. Гупал А.М. Байесовская процедура – оптимальная процедура распознавания и преобразования информации / А.М. Гупал, И.В. Сергиенко // Проблемы управления и информатики. – 2001. – № 3. – С. 5-15.
43. Гупал А.М. Индуктивна математика / А.М. Гупал, І.В. Сергієнко// Вісник НАН України. – 2002. – № 5. – С. 19-25.
44. Гупал А.М. Индуктивный подход в математике / А.М. Гупал, А.А. Вагис // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 2. – С. 83-90.
45. Гупал А.М. Обучение на байесовских сетях / А.М. Гупал, А.А. Вагис // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 3. – С. 106-111.
46. Гупал А.М. Оптимальные процедуры распознавания / А.М. Гупал, И.В. Сергиенко. – К.: Наукова думка, 2008. – 232 с.
47. Данилов В.Я. Виявлення хаосу в нелінійних динамічних системах та псевдо фазова реконструкція атракторів / В.Я. Данилов, О.Л. Жиров, А.Ю. Зінченко // Наукові праці Миколаївського державного гуманітарного університету ім. П. Могили: Науково-методичний журнал. – 2013. – Вип. 201. – С. 85-90.

48. Данелия А.И. Зарамагские ГЭС: проектные решения и ход строительства / А.И. Данелия, П.Г. Кочиев и др. // Гидротехническое строительство, 2007. – № 6. – С. 54-59.

49. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 37 с.

50. Дейнека В.С. Системный анализ многокомпонентных распределенных систем / В.С. Дейнека, И.В. Сергиенко. – К.: Наук. думка, 2009. – 640 с.

51. Демківський Є.О. Аналіз даних з використанням байєсівських моделей / Є.О. Лемківський, П.І. Бідюк, О.П. Бідюк / Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – №1. – С. 40-54.

52. Дерюгин Г.К. Разрушение плотин в связи с пропуском сбросных расходов / Г.К. Дерюгин, О.С. Наумов // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 7. – С. 30-33.

53. Довгий С.О. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень / С.О. Довгий, П.І. Бідюк, О.М. Трофимчук, О.І. Савенков. – К.: Азимут-Україна, 2011. – 608 с.

54. Довгий С.О. Системи підтримки прийняття рішень на основі статистично-ймовірнісних методів / С.О. Довгий, П.І. Бідюк, О.М. Трофимчук. – К.: Логос, 2014. – 419 с.

55. Дрозд І.П. Концепція прийнятного ризику та проблеми забезпечення техногенної безпеки в Україні / І.П. Дрозд, А.С. Охота // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – 2011. – К.: – Вип. 7. – С. 82-108.

56. Єрмольєва Т.Ю. Керування катастрофічними ризиками для стабільного розвитку районів, яким загрожують стихійні лиха / Т.Ю. Єрмольєва, І.В. Сергієнко // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – №3. – С. 112-128.

57. 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.

58. Закон України «Про об'єкти підвищеної безпеки» // Відомості Верховної Ради України. – 2001. – № 15. – Ст. 73.
59. Згуровский М.З. Информационный подход к анализу и управлению проектными рисками / М.З. Згуровский, И.И. Коваленко та ін. // Проблемы управления и информатики. – 2000. – № 4. – С. 148-156.
60. Згуровський М.З. Методи побудови байєсівських мереж на основі оціночних функцій / М.З. Згуровський, П.І. Бідюк, О.М. Терентьєв // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – №2. – С. 81-88.
61. Згуровский М.З. Системный анализ / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. – К.: Наукова думка, 2011. – 900 с.
62. Иванов В.Н. Уроки аварии, произошедшей 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС / В.Н. Иванов // Гідроенергетика України. – 2010. – № 4. – С. 48-50.
63. Иванюта С.П. Екологічна та природно-техногенна безпека України: регіональний вимір загроз та ризиків: монографія / С.П. Иванюта, А.Б. Качинський. – К.: НІСД, 2012. – 306 с.
64. Ильин Ю.А. Расчет надежности подачи воды / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
65. Кавешников Н.Т. Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений / Н.Т. Кавешников. – М.: Агропромиздат, 1989. – 272 с.
66. Калустян Э.С. Статистика и причины аварий плотин / Э.С. Калустян // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – №3. – 1997. – С.40-50.
67. Капур К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. Пер. с англ. [Под ред. И.А. Ушакова]. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
68. Касти Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Дж. Касти. – М.: Мир, 1982. – 216 с.
69. 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.
70. Качинський А.Б. Засоби системного аналізу безпеки складних систем / А.Б. Качинський. – К.: Євроатлантикінформ, 2006. – 366 с.

71. Качинський А.Б. Структурний аналіз системи забезпечення екологічної та природно-техногенної безпеки України / А.Б. Качинський, Н.В. Агаркова // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – № 1. – С. 7-15.
72. Коваленко И.Н. Методы расчета высоконадежных систем / И.Н. Коваленко, Н.Ю. Кузнецов. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
73. Королев В.Ю. Математические основы теории риска / В.Ю. Королев, В.Е. Бенинг, С.Я. Шоргин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544 с.
74. Коршевніюк Л.О. Концепція аналітичної класифікації ризиків в задачах системного аналізу складних систем / Л.О. Коршевніюк // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2015. – №13. – С. 19-28.
75. Коршевніюк Л.О. Формалізація постановки задачі керування ризиками в системах різної природи / Л.О. Коршевніюк, П.І. Бідюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». Інформаційні технології, системний аналіз та керування. – 2013. – №6. – С. 49-54.
76. Ландау Ю.А. Основные тенденции развития гидроэнергетики Украины / Ю.А. Ландау // Техногенна безпека. – 2012. – Том 53. – Вип. 40. – С. 82-86.
77. 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.
78. Львов А.В. Надежность и экологическая безопасность гидроэнергетических установок / А.В. Львов, М.П. Федоров, С.Г. Шульман – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 440 с.
79. Льюнг Л. Идентификация систем / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 431 с.
80. Ляпичев Ю.П. Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений / Ю.П. Ляпичев. – М.: РУДН, 2008. – 222 с.
81. Максимей І.В. Технологія імітаційного моделювання параметричних відмов технічних систем / І.В. Максимей, Д.М. Шевченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2011. – № 3. – С. 29-37.
82. Маліздерський Р.М. Обґрунтування надійності аркової греблі в умовах невизначеності / Р.М. Маліздерський, Д.В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 3 (47). – Ч 1. – Рівне: НУВГП. – 2009. – С. 392-399.

83. Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений / Л.К. Малик // Проблемы безопасности. – М.: Наука, 2005. – 354 с.
84. Маршалл В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 671 с.
85. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д.Мако, И.Такахара. – М.: Мир, 1973. – 343 с.
86. Методика ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів / Затверджена наказом МНС України від 23.02.2006 р. за № 98. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 20.03.2006 р. за № 286/12160.
87. Мирцхулава Ц.Е. Опасности и риски на некоторых водных и других системах. Виды, анализ, оценка / Ц.Е. Мирцхулава. – Тбилиси: «Мецниереба» («Наука»), 2003. – 538 с.
88. Мищенко Б.И. Причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, вытекающие из анализа Акта технического расследования / Б.И. Мищенко // Гідроенергетика України, 2010. № 3. С. 25-31.
89. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 487 с.
90. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер / Пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 206 с.
91. Нагрузка и прочность воздушных линий электропередачи. Международная электротехническая комиссия, технический комитет 11: Рекомендации для воздушных линий. – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 53 с.
92. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т./ Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др. Т. 2.: Математические методы в теории надежности и эффективности [Под ред. Б.В. Гнеденко]. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
93. Науменко І.І. Надійність споруд гідромеліоративних систем / І.І. Науменко. – К.: ІСДО, 1994. – 424 с.
94. Нужный А.С. Регуляризация Байеса в задаче аппроксимации функции многих переменных / А.С. Нужный, С.А. Шумский // Математическое моделирование. – 2003. – Том 15. – № 9. – С. 55-63.

95. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений гидроэнергетических объектов Украины на Днепровском каскаде. 1243–1–P1, 1243–1–P2. В 2-томах. – Харьков: Укрэнергопроект, 2001. – 58 с. – 41 с.

96. Оптнер С.Л. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем / С.Л. Оптнер. – М.: Советское радио, 1969. – 216 с.

97. Панкратова Н.Д. Концептуальные основы системного анализа рисков в динамике управления безопасностью сложных систем. Часть I. Основные утверждения и обоснования подхода / Н.Д. Панкратова, Б.И. Курилин // Проблемы управления и информатики. – 2000. – № 6. – С. 110-132.

98. Панкратова Н.Д. Концептуальные основы системного анализа рисков в динамике управления безопасностью сложных систем. Часть 2. Общая задача системного анализа рисков и стратегия ее решения / Н.Д. Панкратова, Б.И. Курилин // Проблемы управления и информатики. – 2001. – № 2. – С. 108-126.

99. 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.

100. Панкратова Н.Д. Оцінювання багатофакторних ризиків в умовах концептуальної невизначеності / Н.Д. Панкратова, Н.І. Недашківська // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – №2. – С. 72-82.

101. Панкратова Н.Д. Системний аналіз у динаміці діагностування складних технічних систем / Н.Д. Панкратова // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2008. – № 1. – С. 33-49.

102. Переверза К.В. Сценарний підхід у задачах аналізу складних соціальних систем / К.В. Переверза // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2011. – № 1. – С. 133–143.

103. Переверзев Е.С. Параметрические модели отказов и методы оценки надежности технических систем / Е.С. Переверзев, Л.Д. Чумаков; [Отв. ред. В.С. Будник]. АН УССР, Институт технической механики. – К.: Наук. думка, 1989. – 184 с.

104. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 255 с.

105. Печенин Н.К. Проблемы управления риском / Н.К. Печенин, А.Ю. Логвин // Проблемы анализа риска. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 82-91.
106. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа [Пер. с англ. И. А. Вайнштейна]. – М.: Наука, 1975. – 462 с.
107. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2-е изд. Перераб. И доп. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
108. Поташник С.И. Каскад Среднеднепровских ГЭС: Опыт освоения и эксплуатации / С.И. Поташник – М.: Энергоатомиздат, 1986. –144 с.
109. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика/ В.С. Пугачев. – М.: Наука, 1979. – 495 с.
110. Радаев Н.Н. Элементы теории риска эксплуатации потенциально опасных объектов / Н.Н. Радаев. – М.: РВСН, 2000. – 323 с.
111. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В.Д. Райзер. – М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
112. 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.
113. Рак Т.Є. Інформаційні технології контролю стану активних виробничих систем в екстремальних ситуаціях / Т.Є. Рак // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.63. – К.: 2012. – С. 189-195.
114. Рак Т.Є. Інформаційні технології оцінки професійного рівня і інтелекту операторів для роботи в умовах ризику / Т.Є. Рак // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.62. – К.: 2012. – С. 202-207.
115. Ратушняк Г.С. Лінгвістична логіко-ймовірна оцінка ризиків аварій в системах газопостачання / Г.С. Ратушняк, О.І. Ободянська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №2. – С. 73-78.
116. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
117. Романчук К.Г. Використання байєсівського підходу при управлінні ризиками аварій в складних системах / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Математичне та комп'ютерне моделювання. Зб. наук. праць / Кам'янець-

Подільський національний університет, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України; [А.Ф. Верлань (відп. ред.) та ін.]. – Кам'янець-Подільський: К-ПНУ. – 2008. – Вип. 1. – С.149-155.

118. Романчук К.Г. Дослідження відмовостійкості системи з автоматичним регулюванням / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // XV Int. Conf. «Dynamical system modeling and stability investigation». Modeling & Stability. Abstracts of conference reports. Kyiv, Ukraine, May 25-27. – 2011. – Р. 121.

119. 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.

120. Романчук К.Г. Імовірнісне прогнозування аварійних ситуацій на гідровузлах внаслідок відмови водоскидних споруд за пропускнуою здатністю / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. – Вип. 20. Київ: ІТГП НАНУ, КНУБА. – 2015. – С. 70-79.

121. Романчук К.Г. Імовірнісне прогнозування сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскаді напірних гідроспоруд / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. – Вип. 19. Київ: ІТГП НАНУ, КНУБА. – 2015. – С. 91-99.

122. Романчук К.Г. Імовірнісний аналіз причин аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. – Вип. 14. Київ: КНУБА, ІТГП НАНУ. – 2014. – С. 86-94.

123. Романчук К.Г. Методологія ідентифікації сценаріїв системних аварій на гідровузлах / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT-2014, Київ, 26-30 травня 2014 р./ ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ». –К.: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2014. – С. 149.

124. Романчук К.Г. Метод оцінки значущості за Фусселем – Веслі модельних сценаріїв системних аварій на потенційно небезпечних об'єктах / К.Г. Романчук // Математичне моделювання в економіці. – 2016. – №2. – С. 107-115.

125. Романчук К.Г. Моделювання та аналіз гіпотетичних сценаріїв двох нетипових аварій на гідроенергетичних об'єктах / К.Г. Романчук // Зб. наук.

праць. 12 Міжнародна наук.-практична конференція. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях. Київ – Харків – АР Крим. 2013. – С. 89-101.

126. Романчук К.Г. Моделювання нетипових сценаріїв аварій на гідроенергетичних об'єктах внаслідок відмов автоматики / К.Г. Романчук // Тези доповідей VI міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації». Кам'янець-Подільський національний університет ім. І. Огієнка, 2014. – 136 с.

127. Романчук К.Г. Оптимізація складу зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв при заданому рівні її надійності / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 2 (50). – Рівне: НУВГП. – 2010. – С. 222-228.

128. Романчук К.Г. Про використання сценарного підходу і методу Байєса в задачах оцінки ризиків аварій та управлінні безпекою на гідровузлах // Матеріали 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». м. Київ, Пуща-Водиця. – К.: 2016. – С. 109-110.

129. Романчук К.Г. Про ідентифікацію сценаріїв системних аварій на гідровузлах / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки. Праці III міжнародної наук.-практ. конф. Тези доповідей. ЧНУ. 27-30 травня, 2014 р. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2014. – С. 69-70.

130. Романчук К.Г. Про один підхід до обґрунтування проектних сейсмічних подій на основі оцінки залишкового ризику збитків / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Збірник наукових праць. 14 Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». (5-9 жовтня 2015 р.), м. Київ, Пуща-Водиця. – К.: 2015. – С. 154-159.

131. Романчук К.Г. Про ранжирування модельних сценаріїв системної аварії за ризиком збитків / К.Г. Романчук // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ – 2016). Праці V-ї Міжнародної науково-практичної конференції. 21-24 травня, 2016 р. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2016. – С. 61-63.

132. Романчук К.Г. Про сценарний підхід при оцінці ризику системних аварій / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ – 2015). Праці IV-ї міжнародної науково-практичної конференції. Тези доповідей. ЧНУ. 26-29 травня, 2015 р. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2015. – С. 65-67.

133. Романчук К.Г. Сценарний підхід та метод Байєса при оцінці ризиків системних аварій на гідровузлах / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2016. – №2. – С. 116-124.

134. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2007. – 276 с.

135. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надёжность технических объектов / В.П. Савчук. – М.: Наука, 1989. – 328 с.

136. Севбо А. Состояние проблемы управления рисками при эксплуатации АЭС / А. Севбо, А. Тарановский // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. – Вип. 4. – С. 51-55.

137. Секей Г. Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике / Г. Секей. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 249 с.

138. Сергієнко І.В. Сучасна математика – поєднання дедуктивного та індуктивного підходів / І.В. Сергієнко, А.М. Гупал // Вісник НАН України. – 2003. – № 1. – С. 18-23.

139. Сікора Л.С. Інформаційні причинно-наслідкові моделі дії факторів загроз на енергетично-активні потенційно-небезпечні агреговані об'єкти / Л.С. Сікора, Р.Л. Ткачук, Т.Є. Рак // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.65. – К.: 2012. – С. 134-145.

140. Скакун В.О. Методи та моделі управління ризиком в проектах модернізації потенційно небезпечних об'єктів / В.О. Скакун, Ю.П. Рак // Управління проектами та розвиток виробництва: Зб. наук. праць. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. – № 1(29). – С. 11-17.

141. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. – М.: Госстрой России, 2004. – 24 с.

142. Соложенцев Е.Д. Управление риском и эффективностью в экономике: Логико-вероятностный подход / Е.Д. Соложенцев. – СПб.: Издательство СПбГУ, 2009. – 259 с.

143. Сольский С.В. Надежность накопителей промышленных и бытовых отходов / С.В. Сольский, Д.В. Стефанишин и др. – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2006. – 300 с.

144. Стефанишин Д.В. Вероятностное моделирование гипотетических сценариев двух нетиповых аварий на гидроэнергетических объектах при отказах автоматики: [Электронный документ] / Д.В. Стефанишин, Е.Г. Романчук // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2011. Режим доступа к статье: <http://ramag.ru/prensa/vmgs-heo>.

145. Стефанишин Д.В. Вероятностный прогноз образования заторов в нижнем бьефе строящейся Богучанской ГЭС при заполнении водохранилища / Д.В. Стефанишин, Е.Г. Романчук // Екологічна безпека та природокористування. – Зб. наук. праць. – Вип. 10. – К.: КНУБА, ІТГП НАНУ. – 2012. – С. 121-131.

146. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності / Д.В. Стефанишин. – К.: Азимут-Україна, 2009. – 104 с.

147. Стефанишин Д.В. Досвід і перспективи імовірнісного аналізу надійності й безпеки гідротехнічних споруд ГЕС і ГАЕС/ Д.В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 2 (62). – Рівне: НУВГП. – 2013. – № 2. – С. 108-121.

148. Стефанишин Д.В. Дослідження надійності гідравлічних систем зі складною мережевою структурою методом дерев відмов / Д.В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 2(30). – Рівне: НУВГП. – 2005. – С.75-82.

149. 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.

150. Стефанишин Д.В. Логіко-імовірнісна оцінка ризику збитків від аварійного виліву води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – №3. – С. 130-141.

151. Стефанишин Д.В. Метод аналізу параметричної надійності гідротехнічних об'єктів в рамках системного підходу / Д.В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 3 (35). – Рівне: НУВГП. – 2006. – С.101-110.

152. Стефанишин Д.В. Методика оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах на основі рандомізації результатів розрахунків споруд за методом граничних станів / Д.В. Стефанишин // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наук. праць. – Вип. 34. – Рівне: НУВГП. – 2009. – С.109-115.

153. Стефанишин Д.В. Метод обґрунтування імовірнісних характеристик проектних значень екстремальних подій з врахуванням ризику при розрахунках складних інженерних споруд та систем / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 4 (48). – Рівне: НУВГП. – 2009. – С. 314-323.

154. Стефанишин Д.В. Методологічні підходи до оцінки та врахування ризику в задачах забезпечення надійності і безпеки гребель / Д.В. Стефанишин, О.М. Трофимчук // Концепція захисту критичної інфраструктури: Стан, проблеми та перспективи її впровадження в Україні. Зб. Мат. міжнародної наук.-практичної конференції. (7-8.11. 2013 р., Київ-Вишгород) Національний інститут стратегічних досліджень. Серія «Національна безпека». – Вип. 5. – К.: 2014. – С. 88-98.

155. Стефанишин Д.В. Методологія оцінки та врахування сейсмічного ризику при прийнятті рішень (імовірнісний підхід) / Д.В. Стефанишин // Будівельні конструкції. Вип. 76. Міжвідомчий наук.-технічний зб. «Будівництво в сейсмічних районах України». Зб. наук. праць. – К.: ДП НДІБК. – 2012. – С. 199-204.

156. Стефанишин Д.В. Модель надійності однієї системи з надмірністю, що визначається як система каскадного типу / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 2 (42). – Ч 1. – Рівне: НУВГП. – 2008. – С. 195-201.

157. Стефанишин Д.В. Обоснование мероприятий по повышению безопасности гидротехнических сооружений с учетом риска / Д.В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2010. – Т. 258. – С. 3-9.

158. Стефанишин Д.В. Особливості оцінки надійності систем каскадного типу / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 4(36). – Ч. 1. – Рівне: НУВГП. – 2006. – С. 248-355.

159. Стефанишин Д.В. Оцінка живучості гребель за результатами статистичного аналізу їх аварійності / Д.В. Стефанишин// Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 1 (49). – Рівне: НУВГП. – 2010. – С. 42-48.

160. Стефанишин Д.В. Оцінка ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 4 (44). – Рівне: НУВГП. – 2008. – С.334-340.

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

162. Стефанишин Д.В. Перспективи досліджень ризику в греблебудуванні / Д.В. Стефанишин // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наук. праць. – Вип. 31. – Рівне: НУВГП. – 2007. – С. 212-219.

163. Стефанишин Д.В. Прогнозирование аварийности проектируемых и строящихся плотин на основе результатов статистического анализа произошедших аварий / Д.В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2008. – Т. 251. – С.3-9.

164. Стефанишин Д.В. Прогнозування аварій на греблях в задачах оцінки й забезпечення їх надійності та безпеки / Д.В. Стефанишин // Гідроенергетика України. – № 3-4. – 2011. – С. 52-60.

165. Стефанишин Д.В. Про граничні оцінки ймовірностей техногенних аварій внаслідок малоймовірних сполучень навантажень / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Problems of decision making under uncertainties. Abstracts of XVI Int. Conf. Yalta, Ukraine, October 4-8. – 2010. – P.P. 128-129.

166. Стефанишин Д.В. Про управління системними ризиками / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології в науці, економіці і освіті: Зб. наук. праць VIII Всеукраїнської наук.-практичної конференції; Черкаси-Одеса, 25-27 травня 2011 р. – Черкаси: Брама, видавець Вовчок О.Ю. – 2011. – С. 174-175.

167. Стефанишин Д.В. Про формулу Байєса та деякі її практичні застосування при оцінці ризику аварій / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // 14-та Міжнародна наук. конф. ім. акад. М. Кравчука. – К.: НТУУ «КПІ». – Т 3. – 2012. – С. 127.

168. Стефанишин Д.В. Статистичні оцінки живучості гребель / Д.В. Стефанишин // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. Вип. 11. Київ: КНУБА, ІТГІП НАНУ, 2012. – С. 53-61.

169. Стефанишин Д.В. Сценарный подход к оценке вероятностей аварий на плотинах / Д.В. Стефанишин // Мониторинг. Наука и безопасность. Устойчивость зданий и сооружений. – №1 (9). – 2013. – С. 26-33.

170. Терентьев О.М. Алгоритм ймовірнісного висновку в байесових мережах / О.М. Терентьев, П.І. Бідюк, Л.О. Коршевніук // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2009. – № 2. – С. 107-111.

171. Технология системного моделирования/ Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов и др. [Под общ. ред. С.В. Емельянова и др.]. – М.: Машиностроение, Берлин: Техник, 1988. – 520 с.

172. Тихонов А.Н. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский и др. – М: Наука, 1983. – 198 с.

173. Трофимчук А.Н. Надежность систем сооружение – грунтовое основание в сложных инженерно-геологических условиях / А.Н. Трофимчук, В.Г. Черный, Г.И. Черный. – К.: ПолграфКонсалтинг, 2006. – 248 с.

174. Тулупьев А.Л. Байесовские сети: логико-вероятностный подход / А.Л. Тулупьев, С.И. Николенко, А.В. Сироткин. – СПб.: Наука, 2006. – 607 с.

175. Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика. [Под ред. Малинецкого Г.Г.]. – М.: Наука, 2000. – 432 с.

176. 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.

177. Хлобистов Є. Екологічна безпека і засади визначення ризику техногенних катастроф / Є. Хлобистов // Економіка України. – 2000. – № 6. – С. 38-47.

178. Хохлов Н.В. Управление риском / Н.В. Хохлов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 239 с.

179. Черняк Ю.И. Системный анализ в управлении экономикой / Ю.И. Черняк. – М.: Экономика, 1975. – 191 с.

180. Шапкин А.С. Теория риска и моделирование рискованных ситуаций / А.С. Шапкин, В.А. Шапкин. – М.: Изд.-торговая корпорация. «Дашков и К⁰», 2005. – 880 с.
181. Эддоус М. Методы принятия решений / М. Эддоус, Р. Стенсфилд. Пер. с англ. – М.: ЮНИТИ, Аудит, 1997. – 510с.
182. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: [Пер. с англ./ Под ред. Ю.Н. Руденко]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
183. Яковлєв Є.О. Оцінка еколого-техногенної безпеки міст і селищ України / Є.О. Яковлєв // Стратегічні пріоритети. – 2013. – №4 (29). – С. 146-157.
184. Яцик А.В. Екологічна безпека в Україні / А.В. Яцик. – К.: Генеза, 2001. – 216 с.
185. Andretta M. Some Considerations on the Definition of Risk Based on Concepts of Systems Theory and Probability / M. Andretta // Risk Analysis. – 2014. – Vol. 34. – Issue 7. – P. 1184-1195.
186. A Strategy to Reduce the Risks and Impact of Dams on Floodplains. July 2013. – 52 p.: http://www.floods.org/ace-files/Projects/DamRiskReductionStrategy_20130722_FINAL.pdf.
187. Baecher G.B. Risk of dam failure in benefit-cost analysis / G.B. Baecher, M.E. Paté, R. De Neufville // Water Resources Research. – 2010. – Vol. 16, Issue 3. – P. 449–456.
188. Bayesian data analysis / A. Gelman, J.B. Carlin, H.S. Stern, D.B. Rubin. – New York: Chapman and Hall/CRC, 2004. – 670 p.
189. Bernardo J.M. Bayesian theory / J.M. Bernardo, A.F.M. Smith. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. – 586 p.
190. Blind H. The Safety of Dams / H. Blind // Int. Water Power and Dam Construction, 1983. – Vol. 35. – No. 5. – P. P. 17-21.
191. Dam Breach Incident. Incident Description. ERC Independent Panel of Consultants (IPOC) Report, May 25, 2006. <http://www.ferc.gov/industries/hydro-power/safety/projects/taum-sauk/ipocrpt/full-rpt.pdf>. Taum Sauk Pumped Storage Project (No. P-2277).
192. Dam Failures: Statistical Analysis. ICOLD Bulletin 99. – Paris, 1995. – 73 p.

193. DeKay M.L. Predicting Loss of life in Cases of Dam Failure and Flash Flood / M.L. DeKay, G.H. McClelland // Risk Analysis. – 1993. – Vol. 13. – No.2. – P. 193-205.
194. Ericson C.A. Hazard Analysis Techniques for System Safety / C.A. Ericson // John Wiley & Sons, Inc, 2005. – 499 p.
195. Fault Tree Analysis. Edition 2.0. International Electrotechnical Commission. 2006. ISBN 2-8318-8918-9. IEC 61025. – 52 p.
196. Flage R. Probability and Possibility-Based Representations of Uncertainty in Fault Tree Analysis/ R. Flage, P. Baraldi, E. Zio, T. Aven // Risk Analysis. – 2013. – Vol. 33. – Issue 1. – P. 121-133.
197. Godet M. Creating Future. Scenario planning as a strategic management tool / M. Godet. – Parice: Economica Ltd, 2006. – 369 p.
198. Hansson S.O. Is Risk Analysis Scientific? / S.O. Hansson, T. Aven // Risk Analysis. – 2014. – Vol. 34. – Issue 7. – P. 1173-1183.
199. Hartford D.N.D. Risk and Uncertainty in Dam Safety / D.N.D. Hartford, G.B. Baecher // Published by Thomas Telford, 2004. – 401 p.
200. Hoeg K. Dams: essential infrastructure for future water management/ K. Hoeg // Hydropower and Dams. 2001. World Atlas and Industry Guide. Aqua-Media International, UK. – 37 p.
201. Hoeg K. New dam safety legislation and the use of risk analysis / K. Hoeg // Int. Journal on Hydropower and Dams. – 1998. – No. 5. – P.P. 85-88.
202. Hong, Eun-Soo. Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM / Hong, Eun-Soo; In-Mo Lee, Hee-Soon Shin, Seok-Woo Nam, Jung-Sik Kong // Tunneling and Underground Space Technology. – 2009. – Vol. 24, Issue 3. – P. 269-277.
203. Investigating the Sayano-Shushenskaya Hydro Power Plant Disaster// By A Boyko and S Popov, EKRA-Sibir Ltd. and Nemanja Krajisnik, Siemens Transmission and Distribution Ltd. http://www.powermag.com/issues/features/Investigating-the-Sayano-Shushenskaya-Hydro-Power-Plant-Disaster_3229.html.
204. Johansen P.M. Risk analyses of three Norwegian rockfill dams / P.M. Johansen, S.G. Vick, C. Rikartsen // Hydropower'97, Balkema Rotterdam. 1997. – P.P. 431-442.

205. Khakzad N. Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks / N. Khakzad, F. Khan, P. Amyotte, V. Cozzani // Risk Analysis. – 2013. – Vol. 33. – Issue 2. – P. 292-306.
206. Korb K.B. Bayesian Artificial Intelligence. K.B. Korb, A.E. Nicholson. Sec. Ed. Chapman & Hall/CRC Computer Science & Data Analysis, 2011. – 491 p.
207. Kreuzer H. Uncertainty in the assessment of failure probabilities / H. Kreuzer // Hydropower & Dams. – Issue 6. – 2003. – P.P. 98-101.
208. Kuhn M. Applied Predictive Modeling / M.Kuhn, K.Johnson// Springer Science+Business Media. New York, 2013. – 600 p.
209. Kumamoto H. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists / H. Kumamoto, E.J. Henley. – N.Y.: IEEE Press, 1996. – 597 p.
210. Lagerholm S. Safety and reliability of spillway gates / S. Lagerholm // Repair and upgrading of dams Symposium. – Stockholm: 1996. – P. P. 362-373.
211. Lecornu J. Dam Safety: from the Engineer's Duty to Risk Management / J. Lecornu // The Int. Journal on Hydropower & Dams. 1998. Vol. 5. – P. 43-56.
212. López Droguett E. Bayesian Treatment of Model Uncertainty for Partially Applicable Models / E. López Droguett, A. Mosleh // Risk Analysis. – 2014. – Vol. 34. – Issue 2. – P. 252–270.
213. Medoff M. Functional Safety – An IEC 61508 SIL 3 Compatible Development Process / M. Medoff, R. Faller. – Exida.com L.L.C., Sellersville, PA, USA, 2010. –281 p.
214. Nagarajan R. Bayesian Networks in R: with Applications in Systems Biology / R. Nagarajan, M. Scutari, S. Lèbre. – Springer. – 2013. – 172 p.
215. Pankratova N.D. System strategy for guaranteed safety of complex engineering systems / N.D. Pankratova // Cybernetics and System Analysis. – 2010. – Vol. 46. –No. 2. – P.P. 243-251.
216. Park J. Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems/ J. Park, T.P. Seager, P.S.C. Rao, M. Convertino, I. Linkov // Risk Analysis. – 2013. – Vol. 33. – Issue 3. – P. 356-367.
217. Pedroni N. Uncertainty Analysis in Fault Tree Models with Dependent Basic Events / N. Pedroni, E. Zio // Risk Analysis. – 2013. – Vol. 33. – Issue 6. – P. 1146-1173.

218. Risk Assessment: A brief guide to controlling risks in the workplace. Health and Safety Executive. – 5 p. Режим доступа: www.hse.gov.uk/pubns/indg163.htm.

219. Risk Assessment in Dam Safety Management. ICOLD Bulletin on Risk Assessment. – Paris, 2003. – 120 p.

220. Risk Assessment in Dam Safety Management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications. ICOLD Bulletin 130. – Paris, 2005. – 276 p.

221. Romanchuk K.G. A method of estimation of total accident risks at systems / K.G. Romanchuk, D.V. Stefanyshyn // PDMU. Abstracts of Int. Conf. Kyiv-Rivne, Ukraine, May 12-17, 2008. – P.P. 30-32.

222. Romanchuk K.G. Probabilistic simulation of two untypical accidents occurred at hydropower plants / K.G. Romanchuk, D.V. Stefanyshyn // Proc. of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems». 28.06-02.07, 2011. – Saint-Petersburg, Russia. – P.P. 316-322.

223. Romanchuk K.G. To practical application of Bayes' approach to assessment of total accident risk / K.G. Romanchuk, D.V. Stefanyshyn // XII Int. Scientific Kravchuk Conference. Conf. materials, II. 15-17 May, Kyiv, 2008. – P. 110.

224. Rowe W. An anatomy of risk / W. Rowe // W. J. Wiley. 1997. – 488 p.

225. Salmon G.M. Risk analysis for dam safety / G.M. Salmon, D.N.D. Hartford // Part I, II. Int. Water Power and Dam Construction. March, 1995. – P. P. 42-47.

226. Serafim J.L. Statistics of dam failures: a preliminary report / J.L. Serafim, J.M. Coutinho-Rodrigues // Int. Water Power & Dam Construction, 1989. – Vol. 41. – No. 4. – P. P. 30-34.

227. Smith D. Functional Safety. A Straightforward Guide to applying IEC 1508 and Related Standards / D. Smith, K. Simpson. – Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2004. – 263 p.

228. Stefanyshyn D.V. Probabilistic forecasting of accidents at dams in problems of assessment and supporting their reliability and safety / D.V. Stefanyshyn // Proc. of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems». 18.11-20.11, 2014. Saint-Petersburg, Russia. P.P. 144-149.

229. Stefanyshyn D.V. Selection of extreme events when designing of dangerous facilities with regard to risks of damage (the Bayesian approach) / D.V. Stefanyshyn, K.G. Romanchuk // Proc. of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems». July 6-10, 2010. – Saint-Petersburg, Russia. – P.P. 176-181.

230. 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.

231. Steyvers M. Evaluating Probabilistic Forecasts with Bayesian Signal Detection Models / M. Steyvers, T.S. Wallsten, E.C. Merkle, B.M. Turner // Risk Analysis. – 2014. – Vol. 34. – Issue 3. – P. 435–452.

232. Taum Sauk Pumped Storage Project (No. P-2277). Dam Breach Incident. Incident Description. FERC Staff Report, April 28, 2006. <http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/projects/taum-sauk/staff-rpt.asp>.

233. Taum Sauk Pumped Storage Project (No. P-2277). Dam Breach Incident. Incident Description. ERC Independent Panel of Consultants (IPOC) Report, May 25, 2006. <http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/projects/taum-sauk/ipoc-rpt/full-rpt.pdf>.

234. 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.

235. Tonn B. Evaluating Methods for Estimating Existential Risks / B. Tonn, D. Stiefel // Risk Analysis. – 2013. – Vol. 33. – Issue 10. – P. 1772–1787.

236. Van Notten Ph. Scenario development: a typology of approaches / Ph. Van Notten // Think Scenario. – Rethink Education. – OECD, 2006. – P. 69–84.

237. Wieland M. Dam safety, emergency actions plans and water alarm systems / M. Wieland, R. Mueller // International Water Power & Dam Construction. – January. – 2009. – P. 34-38.

АНОТАЦІЇ

Романчук К.Г. Метод Байєса при оцінці ризиків аварій та управлінні безпекою на гідровузлах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена розробці методів розв'язання задач кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах з метою оцінки та управління їх безпекою.

В дисертації у межах сценарного підходу до прогнозування техногенних аварій застосовано метод Байєса для кількісної оцінки ризиків системних аварій на гідровузлах. Показано, що сценарний підхід в поєднанні з методом Байєса дозволяє оцінити повний (сумарний) ризик збитків від системної аварії на гідровузлі внаслідок довільних, у тому числі і сумісних, аварійних подій з різними наслідками, за деякими модельними, несумісними сценаріями, що формують повну групу подій.

Розв'язано ряд практичних задач імовірнісного прогнозування нетипових сценаріїв системних аварій на гідровузлах, пов'язаних з відмовами автоматичних засобів регулювання, поширення гідродинамічних аварій на каскадах гідропоруд, через відмови водоскидів за пропускну здатністю. Запропоновано новий метод оцінки значущості за Фусселем – Веслі аварійних подій на гідровузлі з метою їх ранжирування за пріоритетом безпеки, який дозволяє виявити не лише найбільш ймовірні сценарії аварій, а й сценарії, обтяжені найбільшими ризиками збитків, і, відповідно, більш повно ідентифікувати пріоритетні чинники аварійності. Розроблено метод обґрунтування зліченної множини аварійних подій на гідровузлі, які мають враховуватися при оцінці ризику, та вибору проектних подій екстремального характеру у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику.

Ключові слова: аварія, безпека, гідровузол, значущість, ймовірність, метод Байєса, модельний сценарій, повна група подій, прогнозування, ризик збитків, складна система, сценарний підхід.

Романчук Е.Г. Метод Байєса при оцінці ризиків аварій і управлінні безпекою на гідроузлах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства Национальной академии наук Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена разработке методов решения задач количественной оценки рисков аварий на гидроузлах с целью оценки и управления их безопасностью.

В диссертации в рамках сценарного подхода к прогнозированию техногенных аварий используется метод Байеса для количественной оценки рисков системных аварий на гидроузлах. Показано, что сценарный подход в сочетании с методом Байеса позволяет оценить полный (суммарный) риск ущербов от системной аварии на гидроузле вследствие произвольных, в том числе и совместных, аварийных событий с разными последствиями, за некоторыми модельными, несовместными сценариями, формирующими полную группу событий. Впервые сформулировано положение о несовместности модельных сценариев аварий. Доказано, что авария на гидроузле может возникнуть вследствие любой с произвольных причин, может состояться в разных формах или видах, но может развиваться только за одним из установленных в виде идеализированных событий-предположений сценариев.

Решен ряд практических задач по вероятностному прогнозированию нетипичных сценариев системных аварий на гидроузлах, связанных с отказами автоматических средств регулирования, распространения гидродинамических аварий на каскадах гидросооружений, из-за отказов водосбросов по пропускной способности. В частности, предложены решения для оценки вероятностей отказа зарезервированной системы с автоматическим переключением на резерв и аварии в системе с автоматическим регулированием нагрузки. По результатам

имитационного моделирования сценариев развития аварии на гидроагрегате №2 Саяно-Шушенской ГЭС, происшедшей в 2009 г., и возникновения аварии на верховом бассейне ГАЭС Таум Саук в 2005 г. было установлено некоторое граничное значение вероятности отказа автоматических устройств, оцениваемое величиной 10^{-2} , год⁻¹, превышение которого может приводить к увеличению вероятности аварии на объекте. Модифицирован метод оценки вероятности отказа водосброса по пропускной способности как однородной системы с неполным функциональным резервированием и разработан метод оценки вероятности отказа водосброса по пропускной способности как неоднородной системы с учетом приоритета исполнения функциональных запросов.

Предложен новый метод оценки значимости по Фусселю – Уэсли аварийных событий на гидроузле с целью их ранжирования по приоритету безопасности, позволяющий выявлять не только наиболее вероятные сценарии аварий, но и сценарии, отягощенные наибольшими рисками ущербов, и, соответственно, более полно идентифицировать приоритетные факторы безопасности. Разработан метод обоснования счетного множества аварийных событий на гидроузле, которые должны учитываться при оценке риска, и выбора проектных событий экстремального характера в соответствии с принципом разумно достижимого низкого риска.

Установлено, что вклады разных сценариев в суммарный риск ущербов аварии на гидроузле и вклады отдельных аварийных событий-причин в полную вероятность аварии, и, соответственно, в суммарный риск ущербов аварии могут существенно различаться. При этом маловероятные аварийные события с большими ущербами могут давать незначительный вклад в суммарный риск ущербов, и ими, при соответствующем обосновании, можно пренебречь. При пренебрежении аварийными событиями, которые сопряжены с незначительными ущербами, но часто повторяются, остаточный суммарный риск ущербов от событий, которые учитываются, может достигать максимума. Такие события следует определять как проектные, при которых должны обеспечиваться несущая способность гидросооружений, функционирование оборудования и т.п. в нормальном режиме без нарушения требований безопасности.

Ключевые слова: авария, безопасность, гидроузел, значимость, вероятность, метод Байеса, модельный сценарий, полная группа событий, прогнозирование, риск ущербов, сложная система, сценарный подход.

Romanchuk K.G. Bayesian method for assessment of accident risks and safety control on waterworks. – Manuscript.

Thesis for academic degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.06 – Information Technologies. – Institute of Telecommunication and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to developing methods for solving problems quantify the risk of accidents on the waterworks to assess and manage their safety.

In the thesis within the scenario approach to forecasting technogenic accidents Bayesian method was used to quantify the risk of system failures on waterworks. It is shown that the scenario approach combined with Bayesian method allows evaluating the total (generalized) risk of losses from the system accident on hydropower because of arbitrary, including compatible, emergency events with different consequences, according to some model incompatible scenarios which form a complete group of events.

A number of practical problems concerning to probabilistic forecasting atypical scenarios of system accidents at waterworks was solved namely those that related failures of automated devices of regulation, propagation the hydrodynamic accidents at cascades of pressure hydraulic structures, due to failures of spillway capacity of weirs. A new method for assessing the importance by Fussel – Wesley of emergency events on hydropower for their ranking by priority of safety was proposed, that can detect not only the most probable accident scenarios, but the scenarios burdened with the greatest risk of losses, and therefore priority factors of accidents can be better identified. The method of study countable set of emergency events considered in assessment of risk and selection of design events of extreme character in accordance with the principle the risk as low as reasonably practicable at waterworks was developed.

Keywords: accident, safety, waterworks, importance, probability, Bayesian method, model scenario, complete group of events, forecasting, risk of losses, complex system, scenario approach.

ДОДАТКИ

Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес на кафедрі гідротехнічного будівництва і кафедрі гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства та природокористування при підготовці магістрів та виконанні ними магістерських робіт.

Додаток Б. Акт впровадження результатів та рекомендацій дисертаційної роботи в Національному університеті водного господарства та природокористування на кафедрі гідротехнічного будівництва при виконанні науково-дослідної роботи «Розробка проекту з уточненням умов експлуатації гідроспоруд ВП ХАЕС, проведення проектно-вишукувальних робіт з використанням бурильних установок» (договір № 2-74) в частині оцінки значущості базових аварійних подій, що можуть призвести до аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС.

Додаток В. Акт впровадження результатів та рекомендацій дисертаційної роботи в Національному університеті водного господарства та природокористування на кафедрі гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин при виконанні науково-дослідної роботи «Робота фахівців НУВГП в складі міжвідомчих комісій з обстеження стану гідротехнічних споруд та їх механічного обладнання гідроелектростанцій ПАТ Укргідроенерго» (договір №2-130) в частині оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах Каховської ГЕС і Дністровської ГЕС-1.

Додаток Г. Акт впровадження результатів та рекомендацій дисертаційної роботи в ПАТ «Укргідропроєкт» при оцінці надійності і безпеки гідроспоруд Дністровської ГЕС-1 і Дністровської ГАЕС в частині формування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлі та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності.

ЗАТВЕДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної,

методичної та виховної роботи,

к. т. н., доцент, Лагоднюк О.А.



« 3 » грудня 2014 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом засвідчено, що результати дисертаційної роботи К.Г. Романчук «Метод Байеса при оцінці ризиків аварій та управлінні безпекою на гідровузлах» (науковий керівник доктор технічних наук Д.В. Стефанишин), яку виконано в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, впроваджено в навчальний процес на кафедрі гідротехнічного будівництва та на кафедрі гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства та природокористування при підготовці магістрів та виконанні ними магістерських робіт.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Завідувач кафедри гідротехнічного будівництва

Національного університету водного господарства

та природокористування, д. т. н., професор

М.М. Хлапук

Завідувач кафедри гідроенергетики,

теплоенергетики та гідравлічних машин

Національного університету водного господарства

та природокористування, д. т. н., професор

О.А. Рябенко

ЗАТВЕДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

та міжнародних зв'язків,

д. е. н. професор, Савіна Н.Б.



« 3 » грудня 2014 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом засвідчено, що результати та рекомендації дисертаційної роботи К.Г. Романчук «Метод Байєса при оцінці ризиків аварій та управлінні безпекою на гідровузлах» (науковий керівник доктор технічних наук Д.В. Стефанишин), яку виконано в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, впроваджено в Національному університеті водного господарства та природокористування на кафедрі гідротехнічного будівництва при виконанні науково-дослідної роботи «Розробка проекту з уточненням умов експлуатації гідротехнічних споруд ВП ХАЕС, проведення проектно-вишукувальних робіт з використанням бурильних установок» (дог. № 2-74) в частині оцінки значущості базових аварійних подій, що можуть призвести до аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Завідувач кафедри гідротехнічного будівництва

Національного університету водного господарства

та природокористування, д. т. н., професор

М.М. Хлапук

ЗАТВЕДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
та міжнародних зв'язків,
д. е. н., професор, Савіна Н.Б.



« 3 » грудня 2014 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом засвідчено, що результати та рекомендації дисертаційної роботи К.Г. Романчук «Метод Байєса при оцінці ризиків аварій та управлінні безпекою на гідровузлах» (науковий керівник доктор технічних наук Д.В. Стефанишин), яку виконано в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, впроваджено в Національному університеті водного господарства та природокористування на кафедрі гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин при виконанні науково-дослідної роботи «Робота фахівців НУВГП в складі міжвідомчих комісій з обстеження стану гідротехнічних споруд та їх механічного обладнання гідроелектростанцій ПАТ Укргідроенерго» (дог. № 2-130) в частині оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах Каховської ГЕС і Дністровської ГЕС-1.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Завідувач кафедри гідроенергетики,
теплоенергетики та гідравлічних машин
Національного університету водного господарства
та природокористування, д. т. н., професор

О.А. Рябенко

«ЗАТВЕДЖУЮ»

Технічний директор

ПАТ «Укргідропроєкт»

В.В. Галат

23.06.2015



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом засвідчено, що результати та рекомендації дисертаційної роботи К.Г. Романчук «Метод Байєса при оцінці ризиків аварій та управлінні безпекою на гідровузлах» (науковий керівник доктор технічних наук Д.В. Стефанишин), яку виконано в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, використано в ПАТ «Укргідропроєкт» у порядку дослідного впровадження при оцінці надійності і безпеки гідроспоруд Дністровської ГЕС-1 і Дністровської ГАЕС в частині формування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлі та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Заступник технічного директора
ПАТ «Укргідропроєкт», д. т. н., професор

О.І. Вайнберг