

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

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**

05.13.06 – Інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Стефанишин Дмитро Володимирович,
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Данилов Валерій Якович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
професор кафедри математичних методів системного аналізу

кандидат технічних наук
Коршевнік Лев Олександрович,
Науково-аналітичний центр ТОВ «ІНФОЕКСПЕРТ», м. Київ,
директор

Захист дисертації відбудеться «30» березня 2017 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.255.01 в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України за адресою: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13, аудиторія № 601.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України за адресою: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

Автореферат розісланий «___» _____ 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.255.01,
кандидат технічних наук



О.Г. Лебідь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне природокористування, інженерна діяльність, транспорт та будівництво, енергетика тощо 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. Серед них виділяються такі унікальні й водночас широко поширені інженерні об'єкти як гідровузли, що мають у своєму складі різні гідроспоруди (греблі, водосховища, водоскиди, гідроелектростанції, шлюзи, протиповіневі дамби й протизсувні споруди тощо), поєднані територіально й функціонально. В багатьох випадках – це надзвичайно складні територіальні системи каскадного типу, що утворюються ланцюжками підсистем, які мають висотно-географічне положення на місцевості та зв'язуються в каскади маси й енергії. Їх розвиток відбувається під впливом настільки великої кількості факторів, а їх стани визначаються настільки значною кількістю параметрів, що всі вони не можуть бути повноцінно врахованими в рамках класичних динамічних моделей. При цьому більшість з факторів і параметрів, що визначають стани гідровузлів, набувають або випадкових значень, або, в тій чи іншій мірі, є невизначеними.

Характерною особливістю гідровузлів є можливість розвитку на них аварій з різних причин, і, відповідно, за різними сценаріями. Серед них можуть бути і аварії за сценаріями, що раніше не мали місце, з невідомих або малоімовірних на разі причин. 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 ускладнюватися і тим, що ресурси, які можуть бути використані для забезпечення надійності й безпеки гідровузлів, у більшості випадків обмежені. Обмеження можуть безпосередньо впливати на стан гідровузла, окремих гідроспоруд, на функціональну готовність персоналу, працездатність устаткування, надійність автоматичних систем регулювання, систем протиаварійного захисту тощо. Тому в кожному конкретному випадку вибір на користь того чи іншого рішення з точки зору мінімізації ризику функціонування гідровузла як потенційно небезпечного об'єкта має здійснюватися з врахуванням пріоритету різних ризиків. Однак для того, щоб цей вибір був раціональним, ризики аварій на гідровузлах повинні оцінюватися адекватно, 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 прогнозування. Все це обумовлює актуальність проблеми кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах на основі моделювання сценаріїв аварій як подій-припущень з використанням байєсівських процедур перетворення ймовірностей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках науково-дослідних робіт Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору (ІТГІП) за двома темами, в яких здобувач був

виконавцем: 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).

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 безпекою гідровузлів як складних систем з врахуванням ризику в рамках сценарного підходу на основі байєсівських процедур перетворення ймовірностей.

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 пропускнуою здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням та розробити метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускнуою здатністю як неоднорідної системи із врахуванням пріоритету виконання різних функціональних запитів;

- на основі сценарного підходу до оцінки ймовірностей аварій і ризику 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 розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності у відповідності з принципом розумно досяжного низького рівня ризику.

Об'єктом дослідження є ризику аварій на гідровузлах, надійність й безпека функціонування гідровузлів як складних ПТС 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, системного аналізу, методи теорії ймовірностей та математичної статистики, 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 полягає в наступному:

- 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 пропускну 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.

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

Розроблені і вдосконалені методи впроваджено і використовувались:

- на кафедрі гідротехнічного будівництва Національного університету водного господарства та природокористування (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» в частині оцінки значущості базових аварійних подій, що можуть призвести до аварійного перепоповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС;

- 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» в частині кількісної оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах Каховської ГЕС і Дністровської ГЕС-1;

- в ПАТ «Укргідропроект» 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;

- 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.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які становлять основний зміст дисертації, автор отримав самостійно. У наукових працях, опублікованих із співавторами, автору дисертації належить:

- аналітичний огляд сучасних підходів і методів для оцінки ризику аварій на гідровузлах й оцінки їх безпеки з врахуванням ризику [1, 2, 7, 15];

- формулювання означень і тверджень, що стосуються оцінки ризику збитків від аварій на основі сценарного підходу та методу Байєса [1, 7, 13, 15, 26, 29];

- розробка алгоритмів і логіко-імовірнісних моделей для оцінки ймовірностей аварій на гідровузлах, проведення чисельних розрахунків та імітаційного моделювання з аналізом отриманих результатів [1, 2, 4-6, 8, 10, 11, 14, 15, 17-19];

- розв'язання задачі оцінки ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та задачі оцінки ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження [8-11, 17-19];

- моделювання гідроспоруд як систем, формулювання принципів системного аналізу при виборі модельних сценаріїв аварій та розробка сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскадах гідровузлів [2, 4-6, 17, 18, 20];

- розробка алгоритмів для ідентифікації значущих аварійних подій за ризиком збитків, обґрунтування зліченої множини розрахункових аварійних подій на гідровузлах та вибору розрахункових максимальних проектних подій екстремального характеру малої ймовірності [7, 12, 15, 16, 25, 27, 28].

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, 2009-2011 рр.); I-III Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Системний аналіз. Інформатика, управління» (м. Запоріжжя, КПУ, 2010-2012 рр.); XII-XIV, XVI, XVII Міжнародних науково-технічних конференціях «Системний аналіз та інформаційні

технології» (м. Київ, ННК «ПСА» НТУУ «КПІ», 2010-2012 рр., 2014, 2015 рр.); 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, XV Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях» (с. Рибаче, Крим, 2013 р.; Київ, 2015, 2016 рр.); 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, 2014-2016 рр.).

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 із 237 найменувань на 22 сторінках, анотацій на 4 сторінках та 4 додатків на 5 сторінках. Обсяг роботи становить 206 сторінок, в тому числі основного тексту 175 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та визначено основні завдання дослідження, описано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** викладено огляд наукової літератури за темою дисертації, окреслено проблему кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах та визначено місце досліджень, наведених у роботі. Проаналізовано основні напрямки досліджень в області оцінки та забезпечення техногенної безпеки, підходи, методи і моделі, що використовуються при оцінці ймовірностей техногенних аварій, й визначено перспективи використання ризик-орієнтованого напрямку досліджень в сфері техногенної безпеки гідровузлів.

В основному дослідження з безпеки гідровузлів як в світі, так і в Україні, розвиваються в двох напрямках: 1) традиційному, як в межах детерміністичного (динамічного) підходу з глибоким аналізом природних та техногенних чинників з метою виявлення строгих (функціональних, логічних) причинно-наслідкових зв'язків між станами гідроспоруд та станами навколишнього середовища, так і в

рамках імовірнісного підходу – з використанням методів аналізу даних, моделей математичної теорії надійності, методів стохастичної динаміки, логіко-імовірнісних методів аналізу надійності і безпеки структурно-складних систем, методів рандомізації традиційних детерміністичних моделей та розрахункових схем споруд, їх конструкцій та основ; 2) ризик-орієнтованому напрямку, як в межах детерміністичного підходу з використанням методів системного аналізу та теорії прийняття рішень, так і в рамках імовірнісного підходу, з різною інтерпретацією аварійних подій – як статистичних фактів з використанням статистичних ймовірностей, так і подій-припущень з використанням суб'єктивних ймовірностей.

Фундаментальні рішення в області традиційного напрямку до оцінки надійності і безпеки складних техногенних об'єктів і систем наведено в роботах В.В. Болотіна. Цей напрямок досліджень, в тому числі і щодо гідроспоруд, розвивався також в роботах Л.Я. Аніщенко, О.І. Вайнберга, П.І. Бідюка, В.С. Дейнеки, С.О. Довгого, В.Я. Данилова, М.З. Згуровського, А.Г. Івахненка, Н.Д. Панкратової, А.В. Перельмутера, І.В. Сергієнка, О.М. Трофимчука, Г.І. Чорного, Є.О. Яковлева та ін., в працях зарубіжних фахівців, серед яких роботи В.А. Акімова, Г. Аугусті, А. Баратта, С.А. Еріксона, Дж. Касті, Х. Кумамото, В. Маршалла, Ц.Є. Мірцхулави, Ст. Оптнера, А.М. Половко, І.О. Рябініна, Е. Дж. Хенлі, С.Г. Шульмана та ін.

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

Ризик-орієнтований напрям знайшов свій розвиток в роботах В.В. Бегуна, П.І. Бідюка, М.М. Биченка, І.П. Дрозд, С.П. Іванюти, М.З. Згуровського, 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. Роуі, П. Словіча, М. Уїланда, Д. Хартфорда, К. Хоега, А.С. Шапкіна, Дж. Фусселя та ін. Фундаментальні рішення в цьому напрямку були отримані О.Г. Наконечним та його учнями.

Ризик-орієнтований напрям не виключає використання фундаментальних рішень в області техногенної безпеки і строгих математичних моделей гідроспоруд. Його основною особливістю є адаптація існуючих методів і моделей до наявної інформації про стан гідроспоруд і навколишнього середовища і використання ризику в якості інструменту для подолання невизначеності.

Складність системної організації гідровузлів, невизначеність або мінливість більшості чинників аварійності – все це вимагає залучення кількісних оцінок ризику в якості міри невизначеності при прийнятті рішень щодо їх надійності і безпеки, де під ризиком аварії розуміється деяка наукова абстракція або формальна модель, яка визначається як комбінація ймовірності відповідної аварійної події та її наслідків.

Оскільки ризик аварії на гідровузлі залежить від ймовірності її реалізації, то однією з основних задач, які вирішуються при кількісній оцінці ризиків аварій, є оцінка їх ймовірностей. При цьому можуть застосовуватися різні підходи, найбільш актуальними серед них є такі:

- використання статистичних оцінок аварійності на гідроспорудах;

– адаптація до нових задач методів та моделей математичної теорії надійності з використанням як параметричних, так системних моделей надійності технічних об'єктів та систем;

– рандомізація традиційних детерміністичних моделей та розрахункових схем гідроспоруд, їх конструкцій та основ;

– логіко-імовірнісне моделювання (методи дерев подій, дерев рішень, дерев помилок, дерев відмов і несправностей тощо);

– реалізація сценарного підходу до прогнозування аварій на основі синтезу різних підходів, методів та моделей.

Найбільш повне вирішення проблеми імовірнісного прогнозування аварій та кількісної оцінки ризику аварій на гідровузлах з врахуванням різних факторів можливе в рамках сценарного підходу, який орієнтується на розробку модельних сценаріїв аварій та використання різних підходів і методів до оцінки ймовірностей аварійних подій. Такий підхід дозволяє зводити складні, обтяжені невизначеністю, неструктуровані або «слабо структуровані» задачі прогнозування аварій на гідровузлах до «більш структурованих» задач прогнозування окремих модельних сценаріїв, що можуть описуватися простішими формальними моделями.

У **другому розділі** сформульовано основні узагальнення – означення і твердження – та здійснено загальну постановку задачі кількісної оцінки ризиків аварій на гідровузлах в рамках сценарного підходу з використанням байєсівського перетворення ймовірностей.

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 $D(A_i)$.

Означення 1. Ризик збитку від аварійної події A_i , несумісної з іншими аварійними подіями, є величина $R(A_i, D_i)$, яка визначається як добуток ймовірності $P(A_i)$ події A_i на величину викликаного нею збитку $D(A_i)$: $R(A_i, D_i) = P(A_i) \cdot D(A_i)$.

Розглянемо деяку злічену множину (групу) \mathbf{E} , в загальному випадку сумісних аварійних подій-причин E_j , $j = \overline{1, m}$, які можуть призводити до ідеалізованих, в загальному випадку 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 кожен з аварійних подій $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, з аварійними подіями $E_j \in \mathbf{E}$, $j = \overline{1, m}$, умовними структурними функціями $\Psi(\mathbf{S} | F_i)$ безпеки (надійності, безвідмовності) системи \mathbf{S} : $\Psi(\mathbf{S} | F_i): \mathbf{E} \rightarrow F_i$, $i = \overline{1, n}$.

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

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 модельних сценаріїв $A_i \in \mathbf{A}$, $i = \overline{1, n}$, ймовірністю

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

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

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:

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

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

де $P(A_i)$ – ймовірність реалізації 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 добутоків $P(A_i) \cdot D(A_i)$:

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

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) $F_i \in \mathbf{F}$, $i = \overline{1, n}$, є величина:

$$P(A | A_i) = \frac{P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}. \quad (5)$$

де $P(F_i)$ – ймовірність відповідної форми або виду аварії A в системі \mathbf{S} . Тут і далі ймовірність $P(A | A_i)$ 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» $P(A | A_i) = \frac{P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}$ деякого сценарію

A_i за ймовірністю його виникнення відрізняється від відповідних «відносних ваг»

$P(A|A_k) = \frac{P(F_k)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}$ інших сценаріїв за ймовірністю їх виникнення для $\forall F_k \in \mathbf{F}, k = \overline{1, n}, k \neq i$, то при $P(F_i) > P(F_k)$ та $D(A_i) < D(A_k)$ сумарний 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 $P(F_i) \cdot D(A_i)$: $R(D, A) < \sum_{i=1}^n P(F_i) \cdot D(A_i)$.

Твердження 2. Якщо форми (види) 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 $D(A_i)$: $R(D, A) = P(F) \cdot \sum_{i=1}^n D(A_i)$.

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

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

$$P(A_i | A) = \frac{P(A | A_i) \cdot P(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(A | A_i) \cdot P(F_i)}. \quad (6)$$

Звідки, з врахуванням (5), повна ймовірність сценарію A_i буде:

$$P(A_i) = \frac{\frac{P^2(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P^2(F_i)}{\sum_{i=1}^n P(F_i)} \right)} \cdot P(A). \quad (7)$$

Для апробації методу розв'язано дві практичні задачі оцінки ризику: 1) кількісної оцінки сумарного ризику збитків від аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 з врахуванням трьох модельних сценаріїв, з якими пов'язуються різні збитки; 2) імовірнісного прогнозування

можливості виникнення видатного затору в нижньому б'єфі Богучанського гідровузла при першому заповненні водосховища на основі історичних даних.

З метою узагальнення байєсівського підходу до оцінки ризиків аварій на гідровузлах розглянуто можливість використання при імовірнісному прогнозуванні аварій байєсівських мереж та наведено три способи формування повних груп подій серед подій-умов, які можуть обумовлювати виникнення аварій на гідропорудах.

Згідно з першим способом нормовані значення $P_i(C_j)$ ймовірностей перевищення $P(C_j)$ подій-умов C_j , $j = \overline{1, J}$, які мають включатися в повну групу, пронумерованих за правилом $P(C_1) < P(C_2) < \dots < P(C_j) < \dots < P(C_{j-1}) < P(C_j)$, будуть:

$$\begin{aligned} P_i(C_1) &= P(C_1); P_i(C_2) = P(C_2) - P(C_1); \dots \\ \dots; P_i(C_j) &= P(C_j) - P(C_{j-1}); \dots; P_i(C_J) = P(C_J) - P(C_{J-1}). \end{aligned} \quad (8)$$

Згідно з другим та третім способами нормування здійснюється за формулами:

$$P_i(C_j) = \frac{\mu \cdot P^*(C_j)}{\sum_{j=1}^J P^*(C_j)}, \quad (9)$$

$$P^*(C_j) = (P(C_j) - P(C_{j-1})) \cdot (2 - v(\chi^2)), \quad (10)$$

$$P^*(C_j) = P(C_j) \cdot \gamma_{w,j} - P(C_{j-1}) \cdot \gamma_{w,j-1}, \quad (11)$$

де $P(C_j)$, $P(C_{j-1})$ – 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 %; $v(\chi^2)$ – 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 може визначатися за формулою:

$$\gamma_{w,j} = 1 + \lg\left(\frac{P(C_{j+1})}{P(C_j)}\right), \quad j = \overline{1, J}. \quad (12)$$

При цьому більш ймовірним подіям-умовам C_j , $j = \overline{1, J}$, в повній групі подій надаватиметься нелінійно зростаюча «вага» (більший пріоритет).

Третій розділ присвячено оцінці ймовірностей нетипових сценаріїв аварій на гідровузлах, зокрема, при відмовах систем автоматики та автоматичних засобів регулювання, на випадок поширення гідродинамічних аварій на каскадах напірних гідропоруд, внаслідок відмов водоскидних споруд за пропускнуою здатністю як систем з неповним резервуванням. Необхідність розв'язання цих задач пояснюється тим, що в останній час, на гідровузлах, в зв'язку з впровадженням автоматизованих систем контролю та управління, експлуатацією унікального устаткування і обладнання, роботою гідропоруд в каскадах гідровузлів тощо виникли передумови

для виникнення на гідровузлах складних системних аварій, що можуть розвиватися за малоймовірними в минулому сценаріями.

Серед останніх таких аварій на гідровузлах виділяються дві аварії, перебіг яких супроводжувався відмовами автоматичних засобів регулювання, оснащених сучасною комп'ютерною технікою. Це добре відома катастрофічна аварія на Саяно-Шушенській ГЕС (СШГЕС, Росія, Хакасія), яка відбулася 17 серпня 2009 р. в результаті руйнування гідроагрегату №2. Аварія розвинулася в катастрофу внаслідок відмови автоматики, що не спрацювала в режимі перекриття напірних трактів аварійно-ремонтними затворами. Інша аварія сталася 14 грудня 2005 р. на ГАЕС Таум Саук (Міссурі, США), де відбулось руйнування дамби огороження верхового басейну внаслідок його переповнення через збій в комп'ютерній програмі системи автоматичного регулювання рівня води в басейні.

Розглянемо зарезервовану систему $S_{2,a}^r$, що складається з основної підсистеми (s_1), підсистеми, що перебуває в «холодному» резерві (s_2), та автоматичного перемикача на резерв ($a_{1,2}$), ймовірності відмов яких $P(s_1)$, $P(s_2)$, $P(a_{1,2})$. Нехай резервна підсистема s_2 вмикається в роботу автоматичним перемикачем на резерв $a_{1,2}$ 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. Тобто система $S_{2,a}^r$ відмовляє, якщо: 1) при працездатному автоматичному перемикачеві 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).

З врахуванням того, що відмови A_1 , A_2 є несумісними подіями (автоматичний перемикач на резерв не може одночасно знаходитись як в працездатному, так і в непрацездатному станах), а також того, що система $S_{2,a}^r$ може функціонувати і при несправному перемикачеві на резерв, якщо при цьому основна система працездатна, та при відмові основної системи при справному на момент спрацювання перемикача на резерв резервному пристрої, було отримано наступну формулу для оцінки повної ймовірності відмови системи $S_{2,a}^r$:

$$P(S_{2,a}^r) = P(s_1) \cdot \left[P(s_2) + \frac{P^2(a_{1,2})}{P(s_1) + P(a_{1,2})} (1 - P(s_2)) \right]. \quad (13)$$

Залежність (13) було використано при ретроспективному прогнозуванні можливості катастрофічного розвитку аварії на гідроагрегаті №2 СШГЕС в 2009 р. за сценарієм відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв $S_{2,a} = \{s_1, a_{1,2}, s_2\}$ у складі: агрегат ГЕС (s_1); аварійний затвор (s_2); автоматичний перемикач на резерв ($a_{1,2}$).

На рис. 1 наведено результати чисельного моделювання ймовірності розвитку аварії 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 відмови аварійного затвору, що перекриває напірний тракт гідроагрегата, $P(s_2) = 10^{-2}$, рік $^{-1}$.

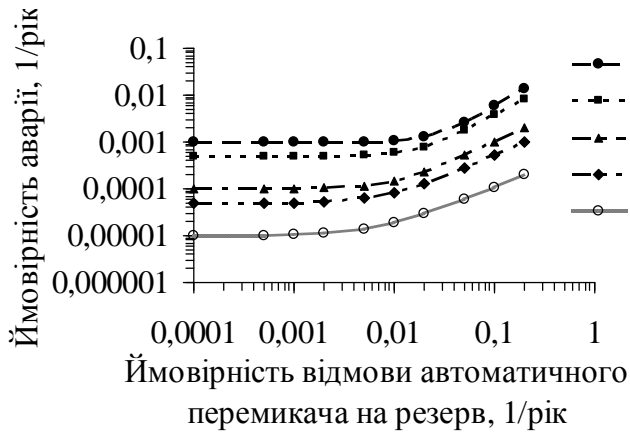


Рис. 1. Залежність ймовірності розвитку аварії на СШГЕС від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв та ймовірності руйнування гідроагрегата

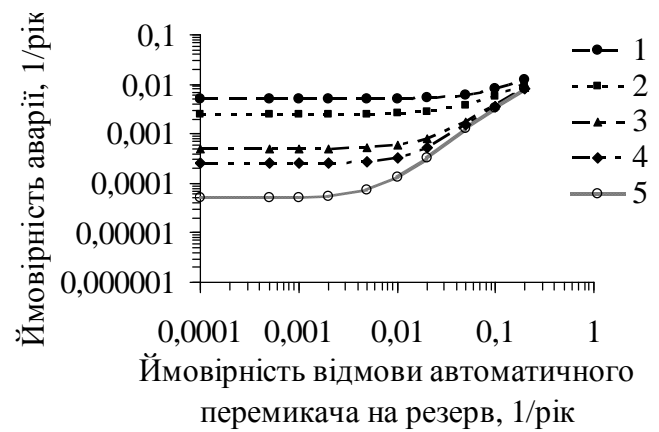


Рис. 2. Залежність ймовірності розвитку аварії на СШГЕС від ймовірності відмови автоматичного перемикача на резерв та ймовірності відмови аварійного затвору

На рис. 2 наведено результати чисельного моделювання ймовірності розвитку аварії на СШГЕС при наступних значеннях ймовірностей відмов аварійного затвору: 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 $^{-1}$. Ймовірність руйнування гідроагрегата $P(s_1) = 5 \cdot 10^{-2}$, рік $^{-1}$.

В склад системи, в якій здійснюється автоматичне регулювання навантаження $\mathbf{S}_{1,a} = \{s_1, s_a\}$, включаються підсистема s_1 , яка власне і виконує загальносистемну функцію, та підсистема s_a , що здійснює автоматичне регулювання навантаження на s_1 .

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 s_a при здійсненні автоматичного регулювання навантаження на підсистему s_1 у складі $\mathbf{S}_{1,a}$; $P(s_{1,0})$ – ймовірність вторинної (залежної) відмови підсистеми s_1 при виконанні загальносистемної функції $\mathbf{S}_{1,a}$ внаслідок перевантаження. Враховуючи можливість відмови системи $\mathbf{S}_{1,a}$ як за умови, коли відмовляє автоматичне регулювання, так і за умови його безвідмовної роботи, отримуємо повну ймовірність виникнення аварії в системі $\mathbf{S}_{1,a}$:

$$P(\mathbf{S}_{1,a}) = P(s_1)(1 - P(s_a)) + \frac{2 \cdot P^2(s_a) \cdot P(s_{1,0})}{P(s_a) + P(s_{1,0})}. \quad (14)$$

На рис. 3 наведено залежності ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження від надійності її структурних одиниць. Чисельне моделювання здійснювалося при ймовірності $P(s_1) = 10^{-3}$, рік $^{-1}$, та наступних значеннях ймовірності $P(s_{1,0})$: 1) $P(s_{1,0}) = 1$, рік $^{-1}$; 2) $P(s_{1,0}) = 10^{-1}$, рік $^{-1}$; 3) $P(s_{1,0}) = 10^{-2}$, рік $^{-1}$; 4) $P(s_{1,0}) = 10^{-3}$, рік $^{-1}$; 5) $P(s_{1,0}) = 5 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$; 6) $P(s_{1,0}) = 10^{-4}$, рік $^{-1}$.

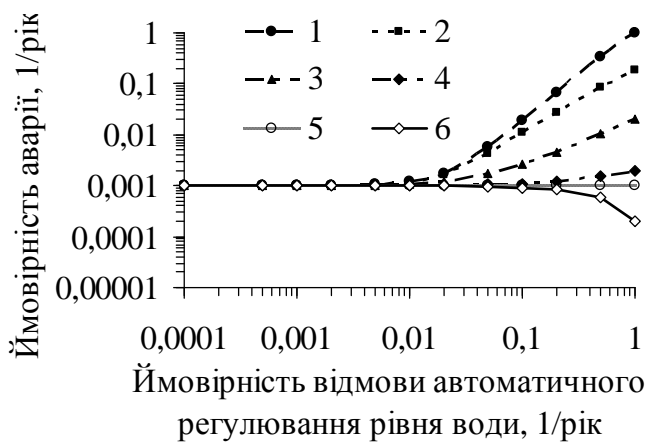


Рис. 3. Залежність ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження від надійності її структурних одиниць

Результати розрахунків наведено на рис. 4. Моделювання здійснювалося при наступних значеннях ймовірності аварії на дамбі огороження: 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 $^{-1}$.

Моделювання можливості розвитку аварій на СШГЕС та на ГАЕС Таум Саук показало, що при $P(s_a) > 10^{-2}$, рік $^{-1}$, ймовірності цих аварій зростають й можуть не залежати від надійності структурних одиниць, які відповідають за резервування: аварійного затвору та дамби огороження, відповідно.

Оцінка ймовірностей модельних сценаріїв поширення гідродинамічних аварій (ГДА) на каскаді з n напірних гідроспоруд, що мають різне висотно-географічне та просторове положення на місцевості, у випадку, коли ГДА на гідроспоруді s_i , яка розташовується вище за течією, почергово призводить до переповнення наступного водосховища й прориву напірного фронту на кожній наступній гідроспоруді в каскаді може здійснюватися за формулою:

$$P(A_i) = \frac{\frac{P^2(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P^2(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)} \right)} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(s_i)] \right), \quad (16)$$

При оцінці ймовірності аварії на верховому басейні ГАЕС Таум Саук розглядалася система $S_{1,a}$ в складі дамби огороження басейну (s_1) та підсистеми s_a – для автоматичного регулювання рівня води в басейні. Оскільки дамба огороження була виконана з ґрунтових матеріалів, то ймовірність руйнування дамби від перевантаження (вторинної відмови s_1) при переповненні водойми внаслідок відмови s_a , приймалася $P(s_{1,0}) = 1$. Відповідно маємо ймовірність аварії:

$$P(S_{1,a}) = P(s_1)(1 - P(s_a)) + \frac{2 \cdot P^2(s_a)}{P(s_a) + 1}. \quad (15)$$

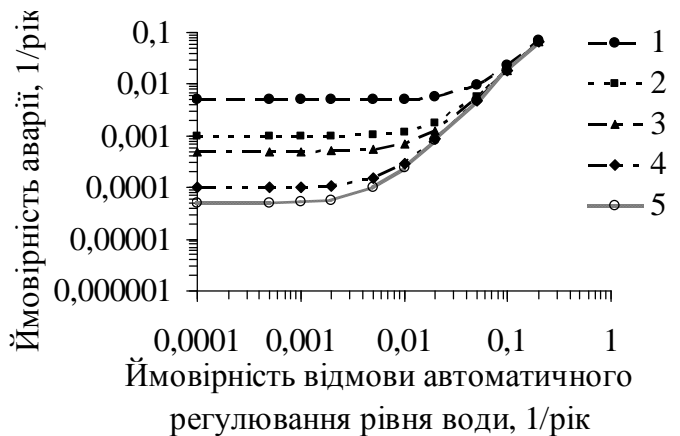


Рис. 4. Залежність ймовірності виникнення аварії на ГАЕС Таум Саук від ймовірності відмови автоматичного регулювання рівня води

де $P(A_i)$ – ймовірність i -го модельного сценарію розвитку ГДА на каскаді з n гідроспоруд при аварії на гідроспоруді s_i , ймовірність виникнення ГДА на якій $P(s_i)$.

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

$$P(A_{i,k}) = P(A_i) \cdot \prod_{j=i+1}^n P(s_{j,i}), \quad (17)$$

де $P(A_i)$ – ймовірність сценарію A_i поширення ГДА на каскаді гідроспоруд, яка встановлюється за формулою (16); $P(s_{j,i})$ – ймовірність умов для наведеної аварії на j -й гідроспоруді, на яку може поширюватися дія від ГДА на i -й гідроспоруді, та від інших гідроспоруд, розташованих вище за течією, у випадку їх руйнування.

Особливу актуальність, зважаючи на суттєве посилення повеневої небезпеки на ріках, зокрема у зв'язку з антропогенними та глобальними кліматичними змінами, старіння гідроспоруд, що знаходяться в тривалій експлуатації, зокрема і водоскидів, механічного обладнання, що на них встановлюється, набуває проблема прогнозування аварій внаслідок відмов водоскидів за пропускною здатністю.

Водоскидні споруди слід розглядати як системи з неповним резервуванням, оскільки при паводках, які є меншими за розрахунковий, але теж можуть нести загрозу, немає потреби приводити до дії всі можливості водоскидних споруд. Однак для пропуску максимального проектного паводка мають використовуватися всі наявні можливості водоскидного фронту гідровузла.

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: $P(s_i) = P(s_j) = P(s)$, $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$. Систему $S_u(n)$, що при цьому формується, можна назвати однорідною.

Розглянемо деякий запит $q_j \in [q_{\min,p}, q_{\max,p}]$ до водоскиду як системи $S_u(n)$ на множині можливих запитів Q по забезпеченню пропуску витрат води: $q_j \in Q$, $q_{j+1} < q_j$, $j = \overline{1, J}$, 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).

Повна ймовірність відмови водоскиду за пропускною здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням $S_u(n)$ при цьому буде:

$$P(S_u(n)) = \sum_{j=1}^J \frac{m!}{n!(n-m)!} [1 - (1 - P(s))^m] \cdot P_i(q_j), \quad (18)$$

де $P_i(q_j)$ – нормована (приведена до повної групи подій) ймовірність запиту $q_j \in Q$, $j = \overline{1, J}$, яку можна отримати згідно з правилами (8)÷(11).

На водоскидах, які не можуть розглядатися як однорідні системи, зазвичай, встановлюється певний порядок виконання елементарних операцій s_i : $s_1, \dots, \succ s_i, \dots, \succ s_n$,

$i = \overline{1, n}$, що забезпечує виконання функціональних запитів з пропуску витрат води: $q_j \in \mathbf{Q}$, $q_{j+1} < q_j$, $j = \overline{1, J}$; \succ – символ відношення «м'якого» підпорядкування за пріоритетом виконання різних елементарних операцій на водоскиді.

Нехай виконання операції s_1 в неоднорідній 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.

У випадку довільного запиту $q_j \in [q_{\min, p}, q_{\max, p}]$ до водоскиду як неоднорідної системи $\mathbf{S}_m(m)$ 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 його відмови водоскиду як неоднорідної системи $\mathbf{S}_m(m)$ відповідно буде:

$$P(\mathbf{S}_m(m) | q_j) = P(A_1) + (1 - P(A_1)) \cdot P(A_2) + \sum_{i=k}^{m-k+1} (1 - P(A_{k-1})) P(A_k) + (1 - P(A_{m-1})) P(A_m), \quad (19)$$

$$\text{де ймовірності: } P(A_1) = P(S_n) P(A_1 | S_n); P(A_1 | S_n) = \frac{P(S_n | s_1) P(s_1)}{\sum_{i=1}^n P(S_n | s_i) P(s_i)}; P(S_n | s_i) = \frac{P(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}$$

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

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

ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_m(n)$, яку можна визначити як ймовірність невиконання будь-якої з операцій s_i , $i = \overline{1, n}$, тим чи іншим методом (дерев відмов тощо); $P(S_{n-k+1})$ – ймовірність відмови системи $\mathbf{S}_m(n-k+1)$, яку можна визначити як ймовірність невиконання будь-якої з операцій s_i , $i = \overline{1, k}$; $P(A_m) = P(s_m)$.

Відповідно повна ймовірність відмови водоскиду за пропускну здатністю як неоднорідної системи $\mathbf{S}_m(n)$ з неповним резервуванням з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів буде:

$$P(\mathbf{S}_m(n)) = \sum_{j=1}^J P(\mathbf{S}_m(m) | q_j) \cdot P_i(q_j), \quad (20)$$

де $P_i(q_j)$ – нормована ймовірність запиту $q_j \in \mathbf{Q}$, $j = \overline{1, J}$, яку можна отримати згідно з правилами (8)÷(11).

В **четвертому розділі** розглянуто загальні принципи та сформульовано першочергові задачі управління безпекою гідровузлів з врахуванням ризиків аварій. В якості основного принципу управління безпекою гідровузлів з врахуванням ризику аварій рекомендовано принцип розумно досяжного низького рівня ризику. Серед першочергових задач, які мають вирішуватися при управлінні безпекою гідровузлів з врахуванням ризику, виділено задачі: 1) ранжирування аварійних подій на гідровузлі за значущістю; 2) обґрунтування зліченої множини розрахункових

аварійних подій та вибору розрахункових проектних подій екстремального характеру малої ймовірності; 3) оптимізації показників надійності засобів автоматичного контролю і регулювання безпеки, що встановлюються на гідровузлах.

Однією з цілей оцінки значущості є ідентифікація найбільш ймовірних сценаріїв аварій і сценаріїв аварій, обтяжених найбільшими ризиками збитків.

Сценарний підхід та метод Байєса дозволяють оцінити значущість аварійних подій за Фусселем – Веслі як за ймовірністю їх реалізації, так і за ризиками збитків.

Так, значущість сценарію A_i за ймовірністю (у відсотках) буде:

$$w_P(A_i)\% = \frac{P(A_i)}{P(A)} \cdot 100\% = \frac{P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i)}{\sum_{i=1}^n \left(P^2(F_i) / \sum_{i=1}^n P(F_i) \right)} \cdot 100\% , \quad (21)$$

за ризиком збитків (у відсотках):

$$w_R(A_i)\% = \frac{P(A_i) \cdot D(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot D(A_i)} \cdot 100\% , \quad (22)$$

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, з якою пов'язується виникнення сценарію A_i ; $D(A_i)$ – збиток, якщо аварія A відбувається за сценарієм A_i .

Як показали дослідження, значущість аварійних подій за ймовірністю і ризиком збитків може суттєво розрізнятися. При цьому кількісна оцінка ризику збитків від аварій на гідровузлі з аналізом значущості аварійних подій за ризиком збитків уможливило вирішення проблеми безпеки гідровузла з врахуванням економічного фактору згідно з принципом розумно досяжного низького рівня ризику.

Зокрема за результатами оцінки значущості аварійних подій за ризиком збитків може здійснюватися економічне обґрунтування додаткових досліджень чинників аварійності, які вносять найбільший внесок в сумарний ризик збитків, і нехтувати малою ймовірними чинниками, хоча і обтяженими великими збитками, внески яких в сумарний ризик збитків є незначним. При цьому допускається певне заниження сумарного ризику збитків від аварії, яке має виправдовуватися меншими затратами на проектування, будівництво та експлуатацію об'єкта тощо. Величина недоврахування ризику при цьому має порівнюватися з додатковими затратами, які слід понести, щоб її врахувати й компенсувати. Це дозволить встановити ціну неврахованого ризику й ефективність додаткових затрат на його подолання.

Однак при виключенні більш ймовірних аварійних подій, обтяжених меншими збитками, сумарний ризик збитків від тих подій, що враховуються, може зростати й сягати максимуму. Для прикладу, на рис. 5, 6 наведено результати оцінки сумарних залишкових ризиків збитків при розв'язанні кількох задач, де різним ймовірностям екстремальних подій, що є незалежними і сумісними, відповідали різні збитки. Це означає, що використання критерію безпеки, за яким обмежується лише ймовірність аварії або деякої екстремальної події, яка може аварію спричинити, не є достатнім для забезпечення належної безпеки такої складної інженерної системи як гідровузол, де можуть відбуватися аварійні події з різними ймовірностями та різними збитками.

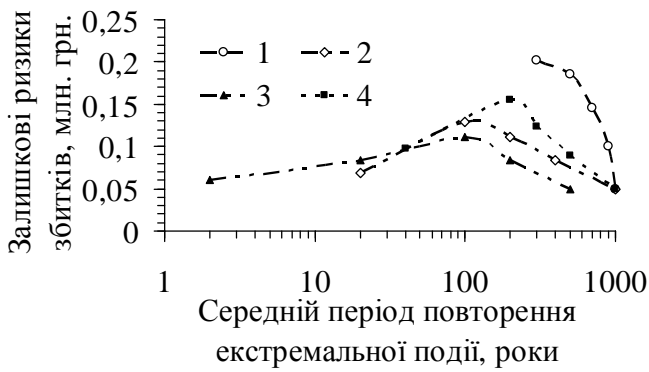


Рис. 5. Криві сумарних залишкових ризиків збитків (задачі 1÷4)

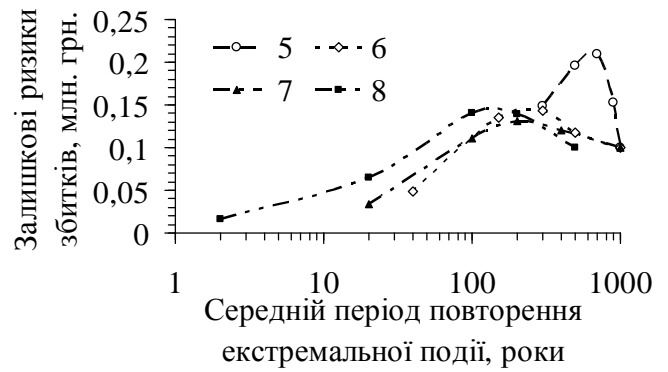


Рис. 6. Криві сумарних залишкових ризиків збитків (задачі 5÷8)

Традиційний підхід до забезпечення надійності і безпеки напірних гідроспоруд передбачає їх розрахунки на впливи від екстраординарних малоймовірних подій, які регламентуються нормами як розрахункові (проектні), по завершенні яких мають зберігатися всі задані параметри несучої здатності споруди, функціонування обладнання тощо в нормальному режимі без порушення вимог безпеки.

Результати оцінки залишкового ризику збитків при різних варіантах залежності збитків від середнього періоду повторення екстремальних подій вказують на можливість при проектуванні споруди раціонального вибору серед них розрахункових подій. Якщо сумарний залишковий ризик збитків від подій, на які споруда не розраховується, і які здатні спричинити аварію, може досягати максимального значення з врахуванням деякої критичної події, то використання цієї події в якості проектної, збитки від якої не допускаються за рахунок відповідних заходів, мінімізує ризик збитків.

В задачах 1÷4 (рис. 5) розглядалися випадки, коли добутки ймовірностей реалізації відповідних екстремальних подій $P(E_i) = 1/T(E_i)$, $T(E_i)$ – середні періоди їх повторення, та збитків $D(A_i)$ від аварій, ними спричинених, були однаковими. В задачах 5÷8 (рис. 6) добутки $P(E_i) \cdot D(A_i)$ збільшуються зі зменшенням ймовірності екстремальної події, а збитки наростають інтенсивніше, ніж зменшується ймовірність події, що може їх спричинити. При розв'язанні кожної задачі оцінювалися залишкові сумарні ризики збитків, починаючи з події E_1 (у цьому випадку 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. Тобто припускалося, що всі події, які мають більшу ймовірність реалізації ніж подія, яка ще враховується при оцінці ризику, вже не здатні викликати жодних збитків.

При впровадженні систем автоматичного регулювання на гідроспорудах важливе значення може мати, як показали дослідження, оптимальне поєднання надійності споруд і надійності засобів автоматизації. В деяких практичних випадках задача оптимізації складу таких систем може бути зведена до встановлення оптимального співвідношення вартості та надійності її окремих структурних одиниць. На прикладі оптимізації складу зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв при заданому рівні її надійності показано, що для розв'язання таких задач може використовуватися метод Лагранжа.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому 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 та висновки:

1. Виконано аналіз сучасних підходів і методів оцінки ймовірностей аварій, оцінки безпеки та управління безпекою гідровузлів в рамках ризик-орієнтованого напрямку досліджень в області техногенної безпеки з врахуванням особливостей гідровузлів як складних систем. Встановлено, що задачі прогнозування аварій на гідровузлах є системними задачами, обтяженими невизначеністю. Показано, що вирішення проблем імовірнісного прогнозування аварій та кількісної оцінки ризику аварій на гідровузлах з врахуванням різних факторів 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. Використано сценарний підхід до оцінки ризиків аварій на гідровузлах на основі методу Байєса, що дозволило розв'язувати задачу кількісної оцінки сумарного ризику збитків від аварії на гідровузлі з врахуванням різних модельних сценаріїв, що розглядаються як несумісні аварійні події-припущення. 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 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. Застосовано метод Байєса до імовірнісного прогнозування нетипових сценаріїв системних аварій на гідровузлах, пов'язаних з відмовами автоматичних засобів регулювання. Розв'язано задачі оцінки ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв та оцінки ймовірності аварії в системі з автоматичним регулюванням навантаження. За результатами імітаційного моделювання сценаріїв розвитку аварії на гідроагрегаті №2 Саяно-Шушенської ГЕС, що відбулася в 2009 р., та 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 автоматики, що використовується на гідровузлах, яка може оцінюватися величиною 10^{-2} , рік⁻¹, перевищення якої може призводити до зростання ймовірності аварії на об'єкті.

4. Проаналізовано особливості аварійності гідровузлів у складі каскадів з врахуванням можливості поширення гідродинамічної аварії на каскад. В рамках байєсівського підходу розглянуто задачі оцінки ймовірностей різних сценаріїв поширення гідродинамічних аварій на каскадах гідропоруд та отримано практичні рішення з імовірнісного прогнозування таких аварій. Модифіковано метод оцінки

ймовірності відмови водоскиду за пропускнуою здатністю як однорідної системи з неповним функціональним резервуванням та розроблено метод оцінки ймовірності відмови водоскиду за пропускнуою здатністю як неоднорідної системи з врахуванням пріоритету виконання функціональних запитів.

5. На основі сценарного підходу до оцінки ризику аварій з використанням методу Байєса розроблено метод оцінки значущості за Фусселем – Веслі аварійних подій на гідровузлі з метою їх ранжирування за пріоритетом безпеки. Встановлено, що ранжирування аварійних подій за значущістю в рамках сценарного підходу до оцінки ризику збитків від аварій з використанням методу Байєса дозволяє виявити як найбільш ймовірні сценарії аварій, так і сценарії, обтяжені найбільшими ризиками збитків, і, відповідно, більш повно ідентифікувати пріоритетні чинники аварійності.

6. На основі сценарного підходу до оцінки ризиків збитків з використанням методу Байєса розроблено метод обґрунтування зліченної множини аварійних подій на гідровузлі, які мають враховуватися при оцінці ризику, та вибору проектних подій екстремального характеру згідно з принципом розумно досяжного низького рівня ризику. Встановлено, що внески різних сценаріїв аварій в сумарний ризик збитків аварії на гідровузлі та внески окремих аварійних подій-причин у повну ймовірність аварії, і, відповідно, в сумарний ризик збитків аварії можуть суттєво розрізнятися. При цьому обтяжені більшими збитками малоймовірні аварійні події можуть давати незначний вклад в сумарний ризик збитків, і ними, при відповідному обґрунтуванні, можна нехтувати. При нехтуванні аварійними подіями, які обтяжені незначними збитками, але часто повторюються, залишковий сумарний ризик збитків від подій, що враховуються, може сягати максимуму. Такі події слід визначати як проектні, при яких мають забезпечуватися несуча здатність гідроспоруд, функціонування обладнання тощо в нормальному режимі без порушення вимог безпеки.

7. Загальне практичне значення результатів досліджень полягає в тому, що вони можуть бути використані в структурах Міненерговугілля, Мінприроди, Держводгоспу, Державного комітету з надзвичайних ситуацій, в підрозділах ПАТ «Укргідроенерго», ПАТ «Укргідропроєкт» та в інших організаціях при прийнятті рішень щодо стану та надійності гідровузлів при їх проектуванні, будівництві, реконструкції і експлуатації. Розроблені методи оцінки ризику на гідровузлах було реалізовано в учбовому процесі і апробовано при розв'язанні практичних задач, що підтверджено відповідними актами впровадження від Національного університету водного господарства та природокористування та ПАТ «Укргідропроєкт».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.

2. Стефанишин Д.В. Логіко-імовірнісна оцінка ризику збитків від аварійного вилування води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – №3. – С. 130-141.

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Романчук К.Г. Імовірнісне прогнозування аварійних ситуацій на гідровузлах внаслідок відмови водоскидних споруд за пропускною здатністю / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. Вип. 20. Київ: ІТГП НАНУ, КНУБА. 2015. – С. 70-79.
7. 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 / К-ПНУ ім. І. Огієнка, 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.
8. Романчук К.Г. Імовірнісне моделювання сценаріїв двох нетипових аварій на гідроенергетичних об'єктах / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Гідроенергетика України. № 2-3. 2014. – С. 20-25.
9. 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.
10. 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://pamag.ru/pressa/vmgs-heo>.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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. – 36. наук. праць. – Вип. 10. – К.: КНУБА, ІТГП НАНУ. – 2012. – С. 121-131.

15. 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.

16. 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. 36. наук. праць. – Вип. 4 (48). – Рівне: НУВГП. – 2009. – С. 314-323.

17. Стефанишин Д.В. Модель надійності однієї системи з надмірністю, що визначається як система каскадного типу / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. 36. наук. праць. – Вип. 2 (42). – Ч 1. – Рівне: НУВГП. – 2008. – С. 195-201.

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

19. Стефанишин Д.В. Оцінка ймовірності відмови зарезервованої системи з автоматичним перемиканням на резерв / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. 36. наук. праць. – Вип. 4 (44). – Рівне: НУВГП. – 2008. – С.334-340.

20. Стефанишин Д.В. Оцінка ймовірності розвитку гідродинамічної аварії, викликані ефектом «доміно», на каскаді напірних гідротехнічних споруд / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. 36. наук. праць. – Вип. 2 (38). – Рівне: НУВГП. – 2007. – С.192-198.

21. Романчук К.Г. Моделювання та аналіз гіпотетичних сценаріїв двох нетипових аварій на гідроенергетичних об'єктах / К.Г. Романчук // 36. 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.

22. Романчук К.Г. Моделювання нетипових сценаріїв аварій на гідроенергетичних об'єктах внаслідок відмов автоматики / К.Г. Романчук // Тези доповідей VI міжнародної наук. конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації». К-ПНУ ім. І. Огієнка, 2014. – 136 с.

23. Романчук К.Г. Про ранжирування модельних сценаріїв системної аварії за ризиком збитків / К.Г. Романчук // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки. Праці V-ї Міжнародної науково-практичної конференції. 21-24 травня, 2016 р. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2016. – С. 61-63.

24. Романчук К.Г. Про використання сценарного підходу і методу Байеса 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.

25. Романчук К.Г. Про один підхід до обґрунтування проектних сейсмічних подій на основі оцінки залишкового ризику збитків / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // 36. наук. праць. 14 Міжнародна наук.-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». м. Київ, Пуща-Водиця. – К.: 2015. – С. 154-159.

26. Romanchuk K.G. A method of estimation of total accident risks at systems / K.G. Romanchuk, D.V. Stefanyshyn // Problems of decision making under uncertainties. Abstracts of Int. Conf. Kyiv-Rivne, Ukraine, May 12-17, 2008. – P.P. 30-32.

27. 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.

28. Романчук К.Г. Про сценарний підхід при оцінці ризику системних аварій / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки. Праці IV-ї міжнародної наук.-практичної конференції. Тези доповідей. ЧНУ. 26-29 травня, 2015 р. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2015. – С. 65-67.

29. 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. конференція ім. акад. М. Кравчука. – К.: НТУУ «КПІ». – Т 3. – 2012. – С. 127.

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 пропускною 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 гідрозулах. – 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.