

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**ЗАВГОРОДНЯ ГАННА АНАТОЛІВНА**

УДК 004.94

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ  
НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТА ТЕХНОГЕННОЇ НЕБЕЗПЕКИ**

05.13.06 – Інформаційні технології

05 Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Г.А. Завгородня

Науковий керівник  
**Корнага Ярослав Ігорович**  
кандидат технічних наук, доцент

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

вчений секретар спеціалізованої вченої ради К 58.082.02

Комар М.П.



Тернопіль – 2019

## АНОТАЦІЯ

**Завгородня Г.А.** Моделі, методи та інформаційна технологія підвищення надійності об'єкта техногенної небезпеки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної задачі розробки моделей і методів зниження ризику виникнення техногенних аварій шляхом створення інформаційної технології, що дозволяє підвищити надійність АГЗС та ефективність управління наслідками техногенних аварій.

**У першому розділі** дисертації наведено класифікацію надзвичайних ситуацій за видами та статистику їх виникнення. Проведений аналіз показує, що надзвичайні ситуації техногенного характеру здатні в будь-який час нанести серйозну втрату у всіх сферах людської діяльності. Обґрунтовано високий рівень небезпечності АГЗС та наведено огляд та класифікацію критичних ситуацій у їх функціонуванні.

Розглянуто класифікацію рівнів небезпеки та кількісні показники ризику аварії, які є основою моделі управління ризиком функціонування АГЗС. Наведено огляд методів аналізу відмов та ризику аварій. Запропоновано розглядати систему управління безпекою і ризиком як складну ієрархічну структуру, а реалізацію стратегій управління ризиком з метою прийняття управлінських рішень ґрунтувати на сучасних інформаційних технологіях.

Встановлено, що процес рішення багатьох завдань оцінки ризиків виникнення техногенних аварій не автоматизований, і вирішується при участі великого числа осіб, що приймають рішення, обмін інформацією між якими найчастіше не автоматизований. Це потребує від них запам'ятовування великої

кількості результатів рішення різних завдань, пов'язаних з оцінкою аварійної ситуації, що підвищує інформаційне навантаження на осіб, що приймають рішення.

Проведено аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуації техногенного характеру. Проведений аналіз літератури показав, що при великому різноманітті робіт у досліджуваній предметній області недостатньо проробленими залишаються питання розпізнавання ситуацій і синтезу варіанта рішення з протидії виникненню техногенних аварій на АГЗС.

Аналіз діяльності осіб, що приймають рішення при оцінці ризиків виникнення техногенних аварій показав, що при зниженні часу, затрачуваного на роботу пов'язану з пошуком, обробкою й відображенням необхідної інформації, може бути підвищена оперативність рішення завдань оцінки аварійної ситуації.

За мету дисертаційної роботи поставлено зниження ризику виникнення техногенних аварій та підвищення ефективності управління їх наслідками за рахунок використання інформаційної технології.

**У другому розділі** виконано моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на АГЗС на основі аналізу умов їх виникнення і розвитку та побудовано дерево відмов функціонування АГЗС.

Активний розвиток методології аналізу ризиків дозволяє їй стати основою для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення прийняттого рівня безпеки практично в усіх сферах людської діяльності. Збільшення складності систем призводить до того, що людина все частіше використовується тільки для затвердження прийнятих рішень, оскільки вона не в змозі оперативно оцінювати наявні обсяги інформації про систему. Ця проблема особливо актуальна для АГЗС, тому розроблені моделі забезпечення надійності та безпеки АГЗС є черговим кроком на шляху до її повного вирішення.

Наведено удосконалену модель та механізм функціонування інформаційної системи АГЗС для підвищення надійності. Модель марковських процесів є адекватним методом для аналізу відмовостійкості систем, який добре

працює разом з деревами відмов – відомим інструментом надійності. Отримані розрахунки наближеного значення імовірності відмови інформаційної системи дозволяють проводити аналіз відмов систем з метою підвищення їх надійності.

**У третьому розділі** розглянуто побудову нейронної мережі, яку можна використовувати для розв'язання задач оцінки ризику, оскільки вона адекватно відображає результат, а також дає можливість оцінювати соціальний ризик для ситуації, що динамічно змінюється. Також застосування нейронної мережі дозволило виявити вхідні параметри, які слабо впливають на результат. Це дозволило зменшити кількість параметрів, необхідних для навчання нейронної мережі.

Розроблено метод подання знань при оцінці ризику виникнення техногенних аварій на АГЗС, реалізація якого припускає рішення як розрахункових, так і логіко-аналітичних завдань, що обумовлено застосуванням методів штучного інтелекту.

Формалізація завдання розпізнавання ситуацій на основі аксіоматичного підходу, припускає побудову формальної теорії предметної області в рамках конструктивної формальної системи. Формалізована аксіоматична теорія дозволила розглядати АГЗС як складну динамічну систему, що складається з об'єктів різної природи, сукупність яких разом з їхніми можливими відображеннями визначають відповідність ситуацій описуваному ризику. Розроблено формальний апарат, який дозволяє перенести отриманий формальний опис предметної області до інформаційної технології та використати його при обробці інформації про стан АГЗС.

Запропоновано метод кількісної оцінки ризику порушення штатного функціонування інформаційної системи АГЗС, який дозволяє прогнозувати розподіл небезпечних зон при аварії; імовірнісний розподіл працівників на об'єкті при аварії; індивідуальний і соціальний ризики для працівників на виробничій площі. Прогнозування ризику дає можливість інформувати працівників про ризик, підвищувати ефективність розроблюваних заходів захисту персоналу при аварії, а також запобігати негативним наслідкам аварій.

У четвертому розділі описано розроблену за інформаційною технологією інформаційну систему, яка реалізує представлені в роботі моделі та методи і була використана для реалізації експериментальних досліджень. Створена ІС підвищення надійності АГЗС, яка призначена для вирішення завдань управління ризиком і орієнтована на вирішення завдань інформаційної підтримки процесів управління ризиками при експлуатації АГЗС. У розділі наведено опис модулів і функціональну схему інформаційної технології підвищення надійності інформаційної системи АГЗС.

Проведено експериментальне дослідження роботи інформаційної системи підвищення надійності АГЗС з метою оцінки індивідуального, територіального та соціального ризиків та наслідків аварій на АГЗС. Результати виконаних розрахунків і оцінок стали основою для підготовки рішень з управління ризиком.

Результати роботи інформаційної системи були порівняні з результатами навчання нейронної мережі, що визначає значення відстані, на якій досягається прийнятний рівень соціального ризику, із встановленням відносної похибки розрахунків. Це дозволило зробити висновок про те, що нейронна мережа навчена за даною технологією дає результат близький до результату роботи інформаційної системи на основі представленого методу.

Розроблено рекомендації зі зменшення ризику, які представляють собою обґрунтовані заходи, засновані на результатах оцінок ризику. Пропонується підвищення рівня безпеки АГЗС за рахунок зниження імовірності виникнення аварії, зменшення сили аварійної події у навколишньому просторі та зменшення масштабів ураження.

Для обґрунтування й оцінки ефективності пропонованих заходів зі зменшення ризику рекомендується дотримуватися двох альтернативних цілей їхньої оптимізації: забезпечення максимального зниження ризику експлуатації АГЗС при заданих засобах та забезпечення зниження ризику до прийняттого рівня при мінімальних витратах.

Основні результати роботи використано на кафедрі технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» при викладанні дисциплін навчального плану підготовки бакалаврів за спеціальностями 121 «Інженерія програмного забезпечення» та 126 «Інформаційні системи та технології».

**Ключові слова:** техногенна аварія, автомобільна газозаправна станція, надійність, оцінка ризику, інформаційна система

## ANNOTATION

**A. Zavgorodnya** Models, methods and information technology to increase the reliability of technogenic danger object. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.13.06 «Information Technologies». – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Ternopil National Economic University, Ternopil, 2019.

The dissertation is devoted to solving the urgent task of developing models and methods of reducing the risk of technogenic accidents by creating information technology, which allows increasing the reliability of the gas station and the efficiency of managing the consequences of industrial accidents.

**Section 1** describes the classification of emergencies by types and statistics of their occurrence. The analysis shows that industrial emergencies are capable of causing serious loss in all spheres of human activity at any time. The high level of danger of the gas station is substantiated and the review and classification of critical situations in their functioning is presented.

The classification of hazard levels and quantitative indicators of accident risk, which are the basis of the risk management model of functioning of the gas station, are considered. An overview of methods of failure analysis and accident risk is given. It is proposed to consider security and risk management system as a complex hierarchical structure, and to implement risk management strategies in order to make management decisions based on modern information technologies.

It is established that the process of solving many problems of risk assessment of industrial accidents is not automated, and is solved with the participation of a large number of decision makers. The exchange of information between decision makers is often not automated. It is required to memorize a large number of results of solving various tasks related to the assessment of an emergency situation, which increases the information burden on decision makers.

The analysis of methods of presenting knowledge in recognition of emergencies of anthropogenic nature is carried out. The conducted analysis of the literature showed that with a wide variety of works in the studied subject area, the issues of situation recognition and synthesis of a solution to counteract the occurrence of industrial accidents at the gas station remain insufficiently elaborated.

Analysis of the activities of decision-makers in the assessment of industrial accidents showed that reducing the time spent on work associated with finding, processing and displaying the necessary information can increase the efficiency of solving problems in the assessment of an emergency.

The aim of the dissertation is to reduce the risk of industrial accidents and increase the efficiency of managing their consequences through the use of information technology.

**Section 2** simulations of scenarios of emergency situations at the gas station on the basis of the analysis of the conditions of their occurrence and development is performed and the tree of failures of functioning of the gas station is constructed.

The active development of risk analysis methodology enables it to become the basis for supporting decision-making to ensure an acceptable level of risk in virtually all areas of human activity. Increasing complexity of systems leads to the fact that people are increasingly used only to approve decisions, because they are unable to quickly assess the available amounts of information about the system. This problem is especially relevant for the gas station, so the developed models for ensuring the reliability and safety of the gas station are another step towards its full resolve.

The advanced model and functional mechanism of the information system of the gas station for improvement of reliability is given. The Markov Process Model is an appropriate method for analyzing system resiliency, which works well with fault trees – a well-known reliability tool. The obtained calculations of the approximate probability of failure of the information system allow analyzing the failures of the systems in order to improve their reliability.

**Section 3** discusses the construction of a neural network that can be used to solve risk assessment tasks, as it adequately reflects the outcome and enables the



assessment of social risk in a dynamic changing environment. Also, the use of neural network revealed the input parameters that have little effect on the result. This reduced the number of parameters required to train the neural network.

A method of presenting knowledge in assessing the risk of industrial accidents at the gas station has been developed, the implementation of which involves the solution of both computational and logical-analytical problems, which is caused by the use of artificial intelligence methods.

Formalization of the problem of recognition of situations on the basis of an axiomatic approach, involves the construction of formal theory of the subject area within the framework of a constructive formal system. Formalized axiomatic theory has made it possible to consider gas station as a complex dynamic system consisting of objects of different nature, the totality of which, together with their possible reflections, determine the correspondence of situations to the described risk. A formal apparatus has been developed that allows to transfer the received formal description of the subject area to information technology and to use it in processing information on the state of the gas station.

A method of quantitative assessment of the risk of disruption of the regular functioning of the information system of the gas station, which allows to predict the distribution of hazardous areas in the event of an accident; probable distribution of employees at the facility in the event of an accident; individual and social risks for workers in the production area. Risk forecasting provides an opportunity to inform employees about the risk, to increase the effectiveness of the developed measures of protection of personnel in the event of accidents, as well as to prevent the negative consequences of accidents.

**Section 4** describes an information technology system that implements the models and methods presented in the paper and has been used to conduct experimental studies. The information system has been created to improve the reliability of the gas station, which is intended to solve the problems of risk management and is focused on solving the problems of information support of risk management processes in the operation of the gas station. The section describes the

modules and the functional diagram of information technology to improve the reliability of the information system of the gas station.

An experimental study of the information system for improvement the reliability of the gas station was conducted in order to assess the individual, territorial and social risks and consequences of accidents at the gas station. The results of the calculations and estimates performed formed the basis for the preparation of risk management decisions.

The performance of the information system was compared with the results of neural network training, which determines the value of the distance at which an acceptable level of social risk is reached, with the establishment of relative error of calculations. This allowed us to conclude that the neural network trained in this technology gives a result close to the result of the information system based on the presented method.

Risk mitigation recommendations have been developed that are measures based on the results of risk assessments. It is proposed to increase the level of safety of the gas station by reducing the likelihood of an accident, reducing the force of an accident in the surrounding area and reducing the scale of the damage.

In order to substantiate and evaluate the effectiveness of the proposed risk mitigation measures, it is recommended to pursue two alternative goals of their optimization: to ensure the maximum reduction of the risk of operation of the gas station at given means and to ensure that the risk is reduced to an acceptable level at the lowest cost.

The main results of the work were used at the Department of Technical Cybernetics of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» when teaching subjects of the curriculum of bachelor training on specialties 121 «Software Engineering» and 126 «Information systems and technologies».

**Key words:** technogenic accident, gas station, reliability, risk assessment, information system

## Список опублікованих праць за темою дисертації

### *Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2018. Вип. 4 (111). С. 43–48. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.4.43-48. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

2. Отрох С.І., Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Грищенко О.О. Аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2018. №3 (51). С. 59-69. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

3. Отрох С.І., Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Аналіз взаємозв'язку збитку з ризиком при виникненні техногенних аварій в концепції прийняттного ризику. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2018. №2 (59). С. 117-123. DOI: 10.31673/2412-4338-2018-0-2-117-123. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

4. Zavgorodnii V., Zavgorodnya A., Maiko V., Malikov V., Zhuk D. Methods and models for assessment of reliability of structural-complex systems. *World Science*. Warsaw: RS Global Sp. z O.O., 2018. №11 (39). PP. 5-14. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/30112018/6227 (Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus).

5. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Метод кількісної оцінки ризику технічних систем. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології»*. Київ: ДУІТ, 2018. Вип. 2 (32). С. 87-95. DOI: 10.32703/2617-9040-2018-32-2-87-95 (Журнал включено до затвердженого

МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

6. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Модель управління ризиком об'єктів підвищеної небезпеки. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2018. №18. С. 52-55. DOI: 10.25313/2520-2057-2018-18-4261. (Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus).

7. Завгородня Г.А., Корнага Я.І., Мухін В.Є., Завгородній В.В., Базака Ю.А. Моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на автомобільних газозаправних станціях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69), №5, Частина 1. С. 92-97. DOI: 10.32838/2663-5941/2019.5-1/14. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus International (Республіка Польща).

8. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Аналіз методів виробки рішень при виникненні техногенних аварій у системах управління реального часу. *Вісник університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*. Київ, 2018. №2 (21/2). С.72-76. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

9. Zavgorodnya A., Zavgorodnii V., Plisenko V., Provatorov N., Kudientsov P. Methods modeling systems for the improvement of their reliability. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2019. № 9(39), Vol.1. PP. 3-12. DOI: 10.31435/rsglobal\_wos/30092019/6683 (Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus).

***Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

10. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Методи аналізу відмов та ризику аварій. *Євроінтеграція в науці та інноваціях: тези доповідей LXI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернівці, 15-16 жовтня 2018 р.)*. Київ: Науково-видавничий центр «Лабораторія думки», 2018. С.18-21.

11. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Аналіз рівня небезпеки у концепції прийняттого ризику. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення*: тези доповідей I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Житомир, 19-20 жовтня 2018 р.). Житомир: Вид. О.О. Євенок, 2018. С.43-44.

12. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Автоматизоване моделювання етапів загального логіко-імовірнісного методу. *Механізми та стратегії розвитку господарюючих суб'єктів в умовах інтеграційних процесів*: матеріали науково-практичної INTERNET-конференції студентів та молодих вчених з міжнародною участю, Wyższa Szkoła Społeczno-Gospodarcza w Przeworsku. (м. Харків – Пшеворськ, 19 лютого 2019 р.). Przeworsk: WSSG, 2019. С. 115-117.

13. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Методи оцінки надійності людино-машинної системи. *Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та праві*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 18-19 квітня 2019 р.). Київ: КНУКіМ, 2019. Ч1. С.30-31.

14. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Шляхи підвищення надійності складних технічних систем в умовах експлуатації. *Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку*: збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 16-17 травня 2019 р.). Київ: ДУІТ, 2019. С. 156-158.

15. Завгородня Г.А. Інформаційна система підвищення надійності потенційно небезпечних об'єктів. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення*: збірник тез доповідей міжнародної наукової інтернет-конференції: випуск 41 (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 р.). Тернопіль, 2019. С. 23-24.

16. Завгородня Г.А. Напрямки підвищення рівня безпеки потенційно небезпечних об'єктів. *Вересневі наукові читання*: збірник наукових матеріалів XXXIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Вінниця, 16 вересня 2019 року.). Вінниця, 2019. Ч.2, С. 9-13.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	16
ВСТУП .....	17
РОЗДІЛ 1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ВИНИКНЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ НА КОМПЛЕКСІ АВТОМОБІЛЬНИХ ГАЗОЗАПРАВНИХ СТАНЦІЙ .....	24
1.1 Класифікація критичних ситуацій у функціонуванні АГЗС .....	25
1.2 Модель управління ризиком функціонування АГЗС .....	33
1.3 Механізми визначення прийняттого ризику .....	37
1.4 Методи аналізу відмов та ризику аварій .....	39
1.5 Аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру .....	42
1.6 Постановка задачі.....	51
1.7 Висновки до розділу 1 .....	53
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АГЗС .....	55
2.1 Моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на АГЗС .....	55
2.2 Модель побудови сценарію небезпечного стану інформаційної системи .....	63
2.3 Удосконалена модель та механізм функціонування інформаційної системи АГЗС для підвищення надійності .....	70
2.4 Висновки до розділу 2 .....	87
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ ВИНИКНЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ НА АГЗС .....	89
3.1 Метод оцінки соціального ризику на основі використання нейронних мереж.....	89
3.2 Метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій на АГЗС .....	94

3.3	Метод вироблення рішень при аварійних ситуаціях техногенного характеру у системах управління реального часу для АГЗС .....	104
3.4	Аналітичні оцінки наслідків аварій на АГЗС .....	109
3.5	Метод кількісної оцінки ризику порушення штатного функціонування інформаційної системи АГЗС .....	115
3.6	Висновки до розділу 3 .....	119
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>		
<b>ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АГЗС .....</b>		
		<b>122</b>
4.1	Структура та опис модулів середовища експериментальних досліджень .....	122
4.2	Експериментальне дослідження роботи інформаційної системи АГЗС .....	128
4.3	Аналіз експериментальних результатів роботи інформаційної системи .....	150
4.4	Висновки до розділу 4 .....	155
<b>ВИСНОВКИ .....</b>		<b>157</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>		<b>160</b>
<b>ДОДАТКИ</b>		
Додаток А. Програмні комплекси автоматизованого моделювання та розрахунку показників надійності і безпеки систем .....		176
Додаток Б. Процес навчання нейронної мережі .....		178
Додаток В. Акти впровадження .....		182
Додаток Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації .....		187

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

НС – надзвичайна ситуація

ТА – техногенна аварія

ОПР – особа, що приймає рішення

ОС – обстановка, що склалася

АГЗС – автомобільна газозаправна станція

ЗВГ – зріджений вуглеводневий газ

ІС – інформаційна система

ППС – паливно-повітряна суміш

ГППС – газопароповітряна суміш



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний рівень організації та управління виробництвом висуває вимоги розробки нових підходів, що базуються на використанні нових інформаційних технологій та інтелектуальних засобів підтримки і прийняття рішень з оперативного управління надзвичайними ситуаціями (НС), пов'язаними з функціонуванням небезпечних промислових об'єктів, а також із прогнозування й оцінки складності їхніх наслідків.

Питанням оцінки ризику і наслідків техногенних аварій присвячені роботи вітчизняних і закордонних учених (Алимов В.Т., Берман А.Ф., Белов П.Г., Єгоров А.Ф., Кумамото Х., Лифар В.О., Лісанов М.В., Можаяєв А.С., Нозик А.А., Савицька Т.В. та ін.).

Не дивлячись на значні успіхи у вирішенні проблем аналізу ризику, далеко не всі задачі в цій області можна вважати вирішеними. Як і раніше, актуальними є дослідження, спрямовані на комплексне прогнозування можливих техногенних НС, аналіз небезпечних виробництв, небезпек на території, одержання достовірної інформації про можливі погрози техногенного характеру.

Забезпечити роботу зі зниження рівня ризику аварій і катастроф здійснити набагато складніше, ніж роботу з подолання наслідків, тому що при цьому вимагаються нові підходи, стратегії, принципи і методи, нові технології і значні кошти. Результати роботи з попередження наслідків аварій можуть проявитися через декілька років при виникненні масштабних техногенних аварій, чи не проявитися при їх відсутності.

Експертиза великих техногенних аварій і катастроф ХХ сторіччя показала, що подальша розробка і реалізація програм науково-технічного розвитку сучасної цивілізації неможлива без системного наукового підходу до вирішення проблеми забезпечення безпечного функціонування складних систем і розробки

інформаційних технологій з використанням методологічного апарату для кількісної оцінки ризику.

Створення фундаментальних наукових, правових і економічних основ забезпечення безпеки є однією з цілей державної науково-технічної політики і державної науково-технічної програми з безпеки природно-технічної сфери, з підвищення безпеки в промисловому, енергетичному, транспортному, будівельному, нафтогазовому, гірничодобувному й оборонному комплексах, зі створення нових матеріалів і технологій.

Одними з головних джерел аварій, вибухів і техногенних катастроф є підприємства нафтохімічного комплексу, зокрема автомобільні газозаправні станції.

Для підтримки прийняття рішень з метою зниження ризику виникнення техногенних аварій, підвищення ефективності цього процесу, а також вірогідності результатів доцільно використовувати можливості сучасних інформаційних технологій. В Україні був прийнятий Указ Президента України №80/2001 від 09.02.2001 року «Про заходи щодо підвищення рівня захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру».

Таким чином, дослідження моделей, методів та інформаційних технологій підвищення надійності об'єктів техногенної небезпеки на сьогодні є актуальним науковим завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Дисертаційну роботу виконано у межах пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки «Інформаційні та комунікаційні технології» та стратегічного пріоритетного напрямку інноваційної діяльності «Розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки», визначених відповідно до Законів України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (№ 2623-III від 11.07.2001 р. в редакції від 16.01.2016 р.) та «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» (№ 3715-VI від 08.09.2011 р. в редакції від 05.12.2012 р.), відповідно до планів науково-

дослідних робіт «Апаратне та програмне забезпечення інформаційних технологій» (державний реєстраційний № 0118U100181), «Застосування комп'ютерних технологій у наукових дослідженнях» (державний реєстраційний № 0118U100179) та «Оптимізація роботи веб-орієнтованих систем з великим набором даних» (державний реєстраційний № 0117U004913), в яких здобувач був виконавцем окремих розділів, а також напрямку наукових досліджень кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка моделей і методів зниження ризику виникнення техногенних аварій шляхом створення інформаційної технології, що дозволяє підвищити надійність АГЗС та ефективність управління наслідками техногенних аварій.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні **основні завдання:**

1. Аналіз моделей управління ризиком виникнення аварій та методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуації техногенного характеру.

2. Розробка методу оцінки імовірності виникнення аварії на автомобільній газозаправній станції із застосуванням «дерева відмов» для аналізу ризиків.

3. Удосконалення моделі функціонування автомобільної газозаправної станції на основі використання сценаріїв аварійних ситуацій.

4. Розробка методу оцінки соціального ризику із застосуванням нейронних мереж.

5. Розробка методу подання знань щодо оцінки ризику виникнення техногенних аварій.

6. Розробка інформаційної технології для автоматизації процесів вироблення рішень при управлінні наслідками надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

7. Розробка рекомендацій з використання запропонованих методів.

**Об'єкт дослідження** – процеси аналізу та управління ризиками виникнення техногенних аварій на автомобільних газозаправних станціях.

**Предмет дослідження** – моделі, методи та інформаційна технологія підвищення надійності автомобільної газозаправної станції.

**Методи дослідження.** Дисертаційне дослідження базується на системному аналізі результатів сучасних теоретичних і прикладних розробок вітчизняних і зарубіжних вчених в галузі аналізу управління ризиком техногенних аварій. При виконанні дослідження були використані логіко-імовірнісні і статистичні методи, метод «дерева відмов», методи аналізу відмов та ризику аварій, методи теорії нейронних мереж, методи теорії інтелектуальних систем, методи розпізнавання інформації, методи формалізації даних, методи подання знань.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Удосконалено метод оцінки імовірності виникнення аварії на автомобільній газозаправній станції, який відрізняється застосуванням «дерева відмов», що дозволяє провести аналіз територіального, індивідуального і соціального ризиків.

2. Удосконалено модель функціонування автомобільної газозаправної станції на основі використання сценаріїв аварійних ситуацій, що дозволяє оцінити імовірність відмови інформаційної системи та підвищити її надійність.

3. Отримав подальшого розвитку метод оцінки соціального ризику, який відрізняється використанням нейронних мереж, що дозволяє визначити рівень соціального ризику в умовах зміни вхідних параметрів і, відповідно, звести його до прийняттого значення.

4. Вперше запропоновано метод подання знань щодо оцінки ризику виникнення техногенних аварій, який дозволяє виконувати обчислення на основі багатозначної логіки для обробки таких знань, що містять елементи невизначеності.

**Практичне значення одержаних результатів.** Створена за інформаційною технологією інформаційна система, що реалізує представлені в

роботі моделі та методи, може бути використана для вирішення завдань управління ризиком і для інформаційної підтримки процесів управління ризиками при експлуатації автомобільної газозаправної станції. Проведені експериментальні дослідження роботи інформаційної системи підтверджують можливість її застосування для оцінки ризиків та наслідків аварій на автомобільній газозаправній станції. Результати виконаних розрахунків і оцінок можуть стати основою для підготовки рішень з управління ризиком.

Практичне значення результатів роботи підтверджено довідками про застосування результатів роботи у навчальному процесі кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського», актами впровадження інформаційної системи на ТОВ «Нафтогазбудінформатика» та у конструкторському бюро інформаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертації одержано автором самостійно, зокрема, в одноосібно підготовлених працях [1, 2]. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, йому належить наступне: аналіз методів оцінки приналежності інформаційних ознак до конкретних ситуацій у процесі їх розпізнавання [3]; обґрунтування вимог до вибору критерію прийнятності ризику при його аналізі [4]; аналіз методів дерев подій та дерев відмов [5]; модель сценарію небезпечного стану та виконання кількісного дослідження надійності складної системи при взаємозалежності базових подій [6]; дослідження питань побудови моделі, яка описує діяльність об'єктів підвищеної небезпеки, і методів прогнозування та оцінки ризиків на цій моделі [7]; узагальнення етапів подієво-логічного підходу, що лежить в основі вирішення завдань моделювання і розрахунку надійності систем за допомогою загального логіко-імовірнісного методу [8]; дослідження реальних аварійних ситуацій, дані яких використовувались в якості вхідної інформації для побудови дерев відмов, декомпозиція цих ситуацій дозволила побудувати моделі причинно-наслідкових зв'язків розвитку сценаріїв прогнозованих небезпек [9]; розрахунок наближеного значення ймовірності відмови системи та аналіз

відмов з метою підвищення надійності функціонування системи [10]; реалізація практичного застосування математичної імовірнісної моделі для прогнозування індивідуального і соціального ризику з використанням інформаційної системи [11]; підхід до формалізації знань про процеси оцінки ситуації з урахуванням невизначеності і динамічності зміни обстановки та з аналізом можливих шляхів розвитку ситуації [12]; розробка методу синтезу варіантів рішень, який дозволяє використати адаптивні алгоритми управління з моделюванням розумової діяльності людини [13]; побудова спрощеної математичної моделі поведінки людини в умовах виникнення аварійної ситуації [14]; аналіз заходів підвищення надійності складних технічних систем в умовах їх експлуатації [15]; розробка та опис модуля інформаційної системи аналізу ризику для оцінки соціально-економічних збитків від виникнення техногенної аварії [16].

**Апробація результатів дисертації.** Основні ідеї, положення та результати наукових досліджень доповідалися на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Євроінтеграція в науці та інноваціях», (Чернівці, 15-16 жовтня 2018 р.); I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (Житомир, 19-20 жовтня 2018 р.); Науково-практична INTERNET-конференція студентів та молодих вчених з міжнародною участю «Механізми та стратегії розвитку господарюючих суб'єктів в умовах інтеграційних процесів» (м. Харків – Пшеворськ, 19 лютого 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та бізнесі» КНУКіМ (Київ, 18-19 квітня 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку», ДУІТ (Київ, 16-17 травня 2019 р.); Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 р.); XXXIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція. – м. Вінниця, 16 вересня 2019 р.

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано в 16 друкованих працях. Статей – 9, з яких 6 статей – у наукових фахових виданнях України з Переліку, затвердженого МОН України; 3 статті в наукових журналах, включених до міжнародних наукометричних баз; 7 публікацій у працях і тезах доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (156 найменувань на 17 сторінках), 4 додатки (на 16 сторінках), містить 9 таблиць, 66 рисунків. Основний текст роботи викладено на 159 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 192 сторінки.

## РОЗДІЛ 1

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ВИНИКНЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ НА АГЗС

Основні напрямки вдосконалювання управління ризиками в кризових ситуаціях визначаються характером розвитку і протікання надзвичайних ситуацій (НС). Самі надзвичайні ситуації характеризуються різними динамічними властивостями, умовами протікання і характером наслідків. До основних класів НС можна віднести і техногенні аварії (ТА). При цьому рішення про управління наслідками відбувається в будь-який час доби і у будь-який час року, що так само накладає відбиток на особливості прийняття рішень і способи боротьби із НС [17]. Діяльність осіб, що приймають це рішення (ОПР) протікає в умовах стресу, в умовах невизначеності обстановки, в умовах неповноти, суперечливості й невизначеності даних, що позначається самим негативним образом на якість і оперативність прийняття рішень [18, 19].

Для підвищення ефективності прийнятих рішень з управління ризиками виникнення ТА необхідно використати всі можливості для скорочення часу аналізу інформації й виробки адекватних рішень, які найбільш повно відповідали тій інформації, що є в розпорядженні ОПР.

На етапі одержання інформації про ТА, що виникла, ОПР повинна забезпечити всебічну та своєчасну оцінку обстановки, що склалася (ОС) і забезпечити інформаційну підтримку для прийняття адекватних і своєчасних рішень по протидії ТА [20, 21].

Висока динаміка зміни обстановки в ході виникнення ТА визначає необхідність проведення додаткових досліджень системи інформаційного забезпечення процесу оцінки ОС ОПР із метою визначення її відповідності розв'язуваним завданням по оцінці ситуацій і виробки відповідних рішень.

Для цього необхідно [22]:

– визначити перелік розв'язуваних завдань оцінки ОС на різних етапах ТА;



- провести аналіз процесів прийняття рішень і виробки основних етапів протидії;
- провести аналіз інформаційного забезпечення процесу оцінки ОС;
- оцінити витрати часу на оцінку ОС і на виконання окремих операцій, пов'язаних з даною оцінкою.

У результаті дослідження діяльності ОПР, визначення витрат часу, що пов'язані з оцінкою ОС, встановлення причин цих витрат, визначимо напрямок подальших досліджень з вдосконалювання інформаційного забезпечення процесу оцінки ОС на етапі виникнення ТА.

### **1.1 Класифікація критичних ситуацій у функціонуванні АГЗС**

Світ, в якому ми живемо, повний небезпек. Щоб вижити у цьому світі, необхідно приділяти належну увагу проблемам безпеки не лише в Україні, але в цілому в міжнародному масштабі. Проблема захисту населення і територій від НС усіх видів є глобальною проблемою і, поза сумнівом, відноситься до сфери національної безпеки [23].

Надзвичайна ситуація – це обстановка на певній території, що склалася в результаті аварії, небезпечного природного явища, катастрофи, стихійного або іншого лиха, які можуть спричинити або спричинили людські жертви, збиток здоров'ю людей, значні матеріальні втрати і порушення умов життєдіяльності людей [24, 25]. Успішно вирішувати завдання забезпечення безпеки життєдіяльності людей в сучасних умовах можливо тільки проведенням цілого комплексу заходів і, передусім, попередженням НС. А для цього необхідно знати причини виникнення цих подій, рушійні сили, характер і стадії розвитку, природу цих явищ. Міністерство внутрішніх справ України наказом від 6 серпня 2018 року № 658 затвердило Класифікаційні ознаки надзвичайних ситуацій [26]. Найчастіше за основу класифікації НС вибирають їх характер виникнення, походження, темпи розвитку (рис. 1.1).



Рис. 1.1 Класифікація НС

НС часто класифікують за масштабом поширення, в поняття якого входять не лише розміри території, на якій виникла НС [27], але і її непрямі наслідки (порушення зв'язку, систем водопостачання і водовідведення, необхідність ремонту або розбирання пошкоджених будівель і споруджень та ін.), а також тяжкість цих наслідків, яку оцінюють за витратою сил і ресурсів, притягнених для ліквідації НС. Характер наслідків виробничих аварій і катастроф залежить від її виду, масштабів і особливостей. Як правило, наслідком великих аварій є пожежі і вибухи, в результаті яких руйнуються будівлі, ушкоджується техніка і устаткування. У ряді випадків вони викликають загазованість атмосфери, розлив нафтопродуктів, а також агресивних рідин [28]. Особливу небезпеку представляють вибухи на підприємствах нафтової, газової і хімічної промисловості. Класифікація НС техногенного характеру [29] представлена на рисунку 1.2.

Аналіз динаміки НС показав, що в цілому кількість надзвичайних ситуацій має тенденцію до зниження, зокрема у 2018 році зареєстровано найменшу кількість загиблих у НС та найменшу кількість НС техногенного характеру за період спостережень 1997-2018 років. Це обумовлено відносно сприятливими погодними умовами та зусиллями щодо запобігання НС.



Рис. 1.2 Класифікація НС техногенного характеру

Протягом 2018 року в Україні зареєстровано 128 надзвичайних ситуацій [30], внаслідок яких загинуло 168 осіб та постраждало – 839. Майже третина цих НС мала техногенний характер. Порівняно з попереднім роком загальна кількість НС зменшилась майже на 23%, при цьому кількість НС техногенного характеру зменшилася на 4,0%. Але, незважаючи на це, зафіксовано зростання на 10 % кількості НС, пов'язаних із пожежами та вибухами. Проте, кількість загиблих та постраждалих у цих НС зменшилася. Водночас у 2018 році кількість НС, пов'язаних із пожежами та вибухами залишилась на рівні попереднього року. За видами НС техногенного характеру розподілилися на:

- 22 НС, пов'язаних із пожежами та вибухами;
- 18 НС на транспорті;
- 5 НС унаслідок аварій на системах життєзабезпечення;
- 1 НС унаслідок аварій на електроенергетичних системах;
- 2 НС, пов'язані із наявністю у навколишньому середовищі шкідливих (забруднювальних) та радіоактивних речовин понад гранично-допустиму концентрацію (ГДК).

За орієнтовними розрахунками матеріальні збитки внаслідок НС техногенного характеру перевищили 40 млн. гривень.

При цьому з 22 НС техногенного характеру пов'язаних із пожежами та

вибухами, які відбулися у 2018 році 10 випадків відбулися на території автомобільних газозаправних станцій (АГЗС) [30], що вказує на високий рівень небезпечності цих об'єктів.

В останні роки ХХ століття газове обладнання на автомобілях було рідкістю, а тому і саме поняття автомобільні газозаправні станції було досить рідкісним. На сьогоднішній день тенденції такі, що кожен рік будуються нові АГЗС. Причиною масового переходу на альтернативні види палива прості та зрозумілі. Вони не тільки екологічно чистіші, але при цьому вони є дешевшими.

Автомобільні газозаправні станції загального користування зазвичай розташовуються в місцях найбільшого скупчення автомобілів: біля автостоянок, в місцях перетину доріг, на автомагістралях, на головних вулицях населених пунктів. У технологічному процесі АГЗС обертається небезпечна речовина, в зв'язку, з чим можливе виникнення техногенної аварії.

Аварії на АГЗС можуть призвести до вибуху та пожежі. При різних обставинах аварія може перерости в НС з ураженням персоналу, транспортних комунікацій, транспортних засобів, що знаходяться на АГЗС, а також населення, що проживає поблизу [31]. Причинами аварій на АГЗС стали відкритий вогонь, іскри, розряди статичної електрики, грозові розряди, самозаймання та само загорання [32]. Результати аналізу причин виникнення аварійних ситуацій на АГЗС графічно інтерпретовані на рисунку 1.3.



Рис. 1.3 Причини аварій на АГЗС

Винуватцями аварій на АГЗС, як правило, є водії автотранспортних засобів та обслуговуючий персонал [33, 34, 35]. Значну частку найпоширеніших причин аварій займає несправність електрообладнання АГЗС (32%), також причинами аварій часто є порушення правил проведення ремонтних робіт і техніки безпеки (18%). Матеріальні збитки внаслідок цих техногенних аварій склали близько 11 млн. грн., кількість загиблих склала 9 чоловік, що на 11% більше ніж у минулому році [30, 36, 37].

Виходячи з цього, постає актуальне питання дослідження моделей, методів та інформаційних технологій для підвищення надійності інформаційної системи АГЗС з метою зниження ризиків виникнення техногенних аварій, які пов'язані з їх діяльністю.

Аварії при значній, на даний момент, кількості АГЗС, трапляються досить рідко. Так, за даними державної служби НС, за останні 10 років відбулося близько 100 НС на АГЗС. Найбільшу небезпеку становлять АГЗС, що експлуатуються дрібними організаціями та приватними підприємцями. Великі компанії включають в свої бізнес-плани заходи щодо усунення недоліків, які призводять до аварій, а виробничий контроль дрібних підприємств має формальний характер. У їх власників немає фінансових можливостей для приведення своїх об'єктів у відповідність до вимог безпеки.

Технологічне обладнання об'єктів зберігання і споживання горючих газів відрізняється підвищеною пожежною небезпекою, так як знаходиться під постійним тиском. При нагріванні стінки резервуара зі зрідженими вуглеводневими газами до температур, що перевищують критичні значення для сталі, з якої виготовлений резервуар, можливий вибух останнього. Вибух судини високого тиску, що містить горючий газ, супроводжується утворенням вогняної кулі, яка, як відомо, має дуже високу вражаючу здатність [38, 39, 40].

Серед аварій на АГЗС слід зазначити інцидент, пов'язаний з витоком газу під час перекачування із автоцистерни, що стався у 2019 році у м. Кропивницький, в результаті якого постраждало 4 особи і було знищено понад 20 автомобілів. Також за останні три роки мали місце інциденти,

пов'язані з пожежами та вибухами на АГЗС, що призвели до травмування і загибелі людей в містах Житомир і Шостка та на трасах Київ-Чоп і Київ-Ковель.

За кордоном прикладом аварії на АГЗС з наслідками, близькими до катастрофічних, може служити інцидент в Південній Кореї в 2001р. Пожежа на АГЗС привела до двох послідовних вибухів наземного резервуара зберігання зрідженого вуглецевого газу (ЗВГ) та автоцистерни ЗВГ з утворенням «вогнених куль», поширенню пожежі на всі навколишні АГЗС будівлі і споруди в радіусі до 100 м, в результаті чого вигорів цілий квартал міста. При цьому в результаті пожежі і вибухів постраждала велика кількість людей. Результати аналізу цієї пожежі доповідалися на V Міжнародному симпозиумі з пожежної науки і технологій [41].

Для оцінки частоти виникнення аварійних ситуацій, що супроводжуються руйнуванням (розгерметизацією) обладнання зі скрапленим вуглеводневим газом, застосовують імовірнісний підхід використовуючи узагальнені середньостатистичні дані. При цьому застосовуються наступні критерії відмов за тяжкістю наслідків [42]: *катастрофічний* (може привести до смерті більше 5 осіб і суттєвого збитку); *критичний* (може привести до смерті від 1 до 5 осіб і суттєвого збитку); *некритичний* (не загрожує життю людей та не призводить до збитку); *зі знехтувано малими наслідками* (відмова, що не належить за своїми наслідками ні до однієї з перших трьох категорій) [43].

Категорії відмов (ступінь ризику), які визначаються шляхом поєднання частоти відмов і тяжкості наслідків (рис. 1.4) [44].

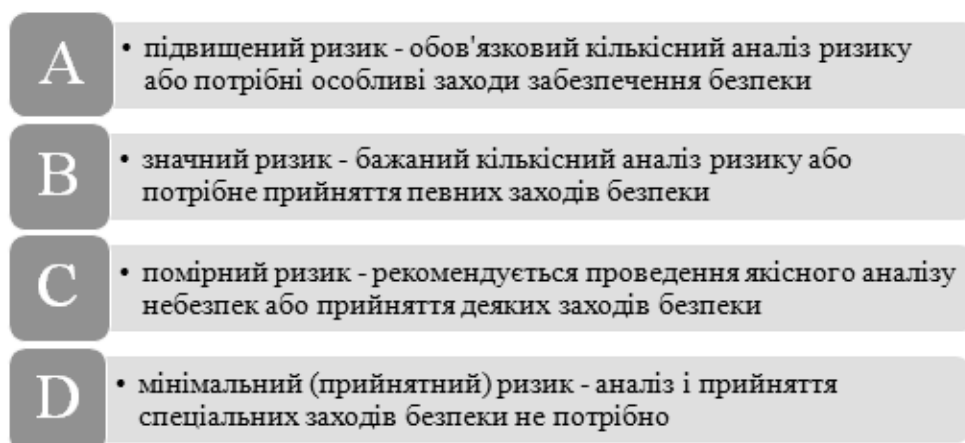


Рис. 1.4 Категорії відмов

Кількісна оцінка частоти можливих аварій, відмов обладнання розраховується виходячи з узагальнених середньостатистичних даних частот відмов (розгерметизації, руйнування) обладнання (табл. 1.1) і відповідних їм наближених викидів небезпечних речовин [45].

Таблиця 1.1

Узагальнені статистичні дані з оцінки частот відмов обладнання

Тип відмови обладнання	Імовірність відмови	Масштаби викиду небезпечних речовин
Руйнування резервуара, автоцистерни	Повне $1 \cdot 10^{-5}$ на рік Часткове $1 \cdot 10^{-4}$ на рік	Повний вміст ємнісного обладнання з урахуванням надходження з сусідніх блоків за час перекриття потоку Об'єм, що витік з отвору $\varnothing 25$ мм за час перекриття потоку
Розгерметизація технологічних трубопроводів	$5 \cdot 10^{-3}$ на 1 км трубопроводу на рік	Об'єм викиду, що дорівнює об'єму трубопроводу, обмеженого арматурою, з урахуванням надходження з сусідніх блоків за час перекриття потоку
Відмова машинного обладнання	$5 \cdot 10^{-3}$ на рік	Об'єм, що витік через торцеві ущільнення або зруйнований вузол за час перекриття потоку
Розрив сполучних рукавів при зливі (наливанні) автомобільних цистерн	$10^{-3}$ на рік на одну заправку $10^{-2}$ на рік на один шланг	Об'єм, що витікає через зливний отвір за час перекриття потоку

Імовірність наведених аварійних ситуацій при експлуатації АГЗС оцінювалася за умови незалежності розгерметизації однієї одиниці обладнання. Виходячи з цього частота повного (часткового) руйнування на рік становить:

- цистерни автомобільної –  $1 \cdot 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup>;
- одного резервуара –  $1 \cdot 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup>;
- двох насосів –  $1 \cdot 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup>;
- трубопроводу –  $1,4 \cdot 10^{-4}$  рік<sup>-1</sup>;
- роздавальних шлангів на заправних колонках –  $1,5 \cdot 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup>;
- зливних рукавів автоцистерни –  $2 \cdot 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup>.

Результати оцінки очікуваної частоти виникнення аварійних ситуацій наведені в табл. 1.2. Згідно проведеної оцінки ризику можливі аварії та відмови обладнання при експлуатації автомобільної газозаправної станції можуть створити ступінь ризику категорії А при повному руйнуванні автоцистерни.

## Результати оцінки очікуваної частоти виникнення аварійних ситуацій

Очікувана частота виникнення, 1/рік					
		Катастрофічна відмова	Критична відмова	Некритична відмова	Відмова зі знехтувано малими наслідками
Часта відмова	$>1$	A	A	A	C
Імовірна відмова	$1 \dots 10^{-2}$	A	A	B <sup>1</sup>	C
Можлива відмова	$10^{-2} \dots 10^{-4}$	A	B <sup>2</sup>	B	C
Рідка відмова	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	A <sup>3</sup>	B <sup>4</sup>	C <sup>5</sup>	D
Майже неможлива відмова	$< 10^{-6}$	B	C	C	D

<sup>1</sup> розрив сполучних рукавів на заправних колонках; розрив зливного рукава автоцистерни

<sup>2</sup> відмова машинного обладнання (насос)

<sup>3</sup> повне руйнування автоцистерни

<sup>4</sup> розгерметизація автоцистерни

<sup>5</sup> руйнування підземного резервуара; розгерметизація трубопроводу

В результаті розливу рідких вуглеводнів, нагрітих до температури кипіння або близької до неї, відбувається випаровування вуглеводнів з поверхні розлиття і утворення парогазової хмари. Вуглеводнева парогазова хмара, яка може містити великий об'єм вуглеводнів, здатна спалахнути або вибухнути при наявності джерела запалювання [46]. В даний час є відомості про декілька використовуваних на практиці програмних комплексів автоматизованого моделювання та розрахунку показників надійності і безпеки систем різних видів, класів і призначення (додаток А, таблиця А.1).

Порівняльний аналіз перерахованих програмних комплексів показав певні переваги технології автоматизованого структурно-логічного моделювання по глибині теоретичної розробки методів, рівню автоматизації процесів моделювання та розрахунків показників, відкритості та доступності програмних засобів до подальшого розвитку та адаптації в нові предметні області [47, 48].

Але, на сьогодні не існує вузької спеціалізованої інформаційної системи управління ризиками виникнення техногенних аварій на АГЗС. Тому, розробка інформаційної технології для підвищення надійності функціонування ІС АГЗС є актуальною задачею.



## 1.2 Модель управління ризиком функціонування АГЗС

*Безпека* – це стан об'єкта захисту, при якому вплив на нього всіх потоків речовини, енергії та інформації не перевищує максимально припустимих значень [49].

*Ризик* – очікувана частота або імовірність виникнення небезпек певного класу, або ж розмір можливого збитку (втрат, шкоди) від небажаної події, або ж деяку комбінацію цих величин [50]. Ризик має розмірність, зворотну часу (якщо для його оцінки використовується частота подій), чи є безрозмірною величиною (у межах від 0 до 1), якщо для його оцінки використовується імовірність виникнення однієї події при настанні іншої події. Оскільки ризик є одним з параметрів об'єкту, то керувати ним неможливо. Тому керуванню підлягає не сам ризик, а процес забезпечення безпеки об'єкта [51].

*Керувати безпекою* – здійснювати вплив з обґрунтування, забезпечення, контролю і підтримки оптимальних за обраним критерієм її кількісних показників при створенні та експлуатації технологічних об'єктів [52].

*Ризик аварії* – міра небезпеки, що характеризує можливість виникнення аварії на небезпечному виробничому об'єкті та ступінь її наслідків [53].

Ризик виникнення аварії обумовлюється наступними необхідними передумовами [54, 55]:

- існування джерел потенційної небезпеки;
- дія факторів ризику (вивільнення цими джерелами речовини, енергії);
- наявність визначеного рівня фактора ризику (для випадків, коли такі граничні значення існують або відомі, що буває не завжди);
- вплив на людей і навколишнє середовище зазначених факторів.

Таким чином, техногенний ризик – це кількісна міра небезпеки, що характеризує одночасно апріорну імовірність або апостеріорну частоту прояву потенційної чи реальної небезпеки і розміри пов'язаного з нею збитку.

*Надмірний рівень ризику* – рівень індивідуального ризику, обумовлений господарською чи іншою діяльністю, що створює неприпустиму загрозу для

людини (індивідуума), за умови, що ця діяльність вигідна для суспільства в цілому [56].

*Гранично допустимий рівень ризику* – рівень індивідуального ризику, що обумовлений господарською діяльністю, і який не повинен перевищуватися незалежно від економічних і соціальних переваг такої діяльності для суспільства в цілому [57].

*Прийнятний рівень ризику* – ризик, рівень якого припустимий і обґрунтований виходячи з економічних і соціальних розумінь. Він знаходиться в діапазоні від гранично припустимого рівня ризику до рівня, яким можна знехтувати ( $10^{-6}$  –  $10^{-8}$  на рік) [58].

Будь-який техногенний об'єкт має визначений рівень небезпеки для людини і навколишнього природного середовища. Прийнятний рівень небезпеки може бути досягнутий різними шляхами.

Так, рівень небезпеки може бути знижений шляхом цілеспрямованої зміни технології, або шляхом використання більш безпечних для людини і природного середовища матеріалів, або шляхом віддалення виробничих об'єктів від населених пунктів.

Необхідною умовою коректного аналізу небезпеки та умовою оптимального вибору способів зниження небезпеки є кількісне вираження рівня потенційної небезпеки. Загальноприйнятою кількісною оцінкою рівня потенційної небезпеки є *оцінки ризику*.

В залежності від режиму функціонування об'єкта, що породжує небезпеку, виділяють оцінки ризику, пов'язані зі штатним режимом функціонування техногенного об'єкта, і оцінки ризику, пов'язані з аварією на об'єкті (оцінки аварійного ризику).

Звичайно рівень аварійної небезпеки значно вище рівня небезпеки, пов'язаного з об'єктом, що функціонує в штатному режимі. В зв'язку з цим оцінки аварійного ризику, як правило, характеризують верхню межу рівня потенційної небезпеки, породжуваної техногенним об'єктом.

Існує два трактування поняття ризику як кількісної міри небезпеки: *ризик* – імовірність появи несприятливої події (апріорне трактування); *ризик* – максимальний збиток, нанесений подією (кількісна оцінка) [59].

Аналітично *ризик* виражає частоту реалізації небезпек стосовно їх можливого числа [60]. У загальному вигляді:

$$R = \frac{N(t)}{Q(f)}, \quad (1.1)$$

де  $R$  – *ризик*;  $N$  – кількісний показник частоти небажаних подій в одиницю часу  $t$ ;  $Q$  – число об'єктів ризику, підданих визначеному фактору ризику  $f$ .

Крім того, відзначається, що іноді *ризик* інтерпретують як математичне очікування збитку, що виникає при аваріях, катастрофах і небезпечних природних явищах [61]:

$$R_{MO} = \sum_i^n R_i Y_i, \quad (1.2)$$

де  $R_{MO}$  – рівень ризику, виражений через математичне очікування збитку;  $R_i$  – імовірність виникнення небезпечної події  $i$ -го виду або типу;  $Y_i$  – величина збитку при  $i$ -й події.

У даній роботі розглядаються такі кількісні показники ризику аварії як територіальний, індивідуальний та соціальний ризику.

*Територіальний ризик* – імовірність загибелі протягом року людини, яка знаходиться в конкретному місці простору, від можливих джерел небезпеки [60, 62].

*Індивідуальний ризик* – імовірність загибелі людини, що знаходиться в даному регіоні, від можливих джерел небезпеки протягом року з урахуванням імовірності її перебування в зоні ураження [60, 63].

*Соціальний ризик* – імовірність загибелі людей понад певну кількість у даному регіоні протягом року від можливих джерел небезпеки, з урахуванням імовірності їх перебування в зоні ураження [60, 64].

Для життя людини рекомендується вважати неприйнятним [60]:  $R_i > 10^{-5}$  – для територіального ризику за межами санітарно-захисної зони об'єкту підвищеної небезпеки;  $R_i > 10^{-6}$  – для індивідуального ризику – для людини, яка знаходиться в конкретному регіоні за межами санітарно-захисної зони об'єкту підвищеної небезпеки;  $R_s > 10^{-5}$  – для соціального ризику загибелі понад 10 чоловік протягом одного року у виділеному регіоні за межами санітарно-захисної зони об'єкта підвищеної небезпеки.

Для забезпечення безпеки небезпечних техногенних об'єктів варто проводити аналіз ризиків, оцінку ризику і управління ризиками.

*Управління ризиком* – це аналіз ризикової ситуації, розробка і обґрунтування управлінського рішення, нерідко у формі правового акту, спрямованого на мінімізацію ризику [65].

*Модель управління ризиком АГЗС складається з чотирьох етапів.*

1 етап: проводиться порівняльна характеристика ризиків з метою встановлення пріоритетів, встановлюється ступінь небезпеки (шкідливості).

2 етап: визначається прийнятність ризику. Ризик зіставляється з низкою соціально-економічних факторів: вигоди від того чи іншого виду господарської діяльності; втрати, обумовлені використанням виду діяльності; наявність і можливості регулюючих заходів з метою зменшення негативного впливу на середовище і здоров'я людини.

3 етап: визначаються пропорції контролю, вибір одного з типових заходів, що сприяє зменшенню чи усуненню ризику.

4 етап: ухвалюється регулююче рішення, визначаються інструкції, завершується процес управління ризиком – виробляється єдиний процес (концепція) прийняття рішень.

Для проведення аналізу ризику, встановлення його припустимих меж у зв'язку з вимогами безпеки і прийняття керуючих рішень необхідна наявність інформаційної технології, що дозволяє оперативно контролювати існуючі джерела небезпеки і стан об'єктів можливого ураження.

### 1.3 Механізми визначення прийнятного ризику

Використання найефективніших систем безпеки, найсучасніших методів контролю за технологічними процесами не забезпечує – і в принципі не може забезпечити – абсолютну надійність роботи, що виключає аварійні ситуації. Нульова імовірність аварії досягається лише в системах, які позбавлені запасеної енергії, хімічно і біологічно активних компонентів [66].

До останнього часу аналіз безпеки проводився на основі методології абсолютної безпеки. Але техногенні катастрофи показали, що дана методологія не відповідає імовірнісній природі аварій, що породжуються малоімовірним фактором. Очікується, що в міру збільшення терміну експлуатації складних об'єктів уже не можна зневажати розвитком аварійних ситуацій, що асоціюються з частотою виникнення в  $10^{-3} - 10^{-4}$  разів на рік, тому що в силу імовірнісного закону великих чисел, настання небажаної події (аварії) для таких систем стає цілком імовірним. Ця обставина привела до зміни концепції абсолютної безпеки на сучасну методологію прийнятного ризику [67].

Створюючи матеріальні блага, людина використовує енергію у взаємодії зі складними технічними системами. Стан захисту таких систем характеризується їх надійністю та ефективністю, не беручи до уваги стан здоров'я людей і якість навколишнього середовища. З огляду на обмеженість матеріальних ресурсів суспільства, вкладаючи все більше засобів у підвищення надійності технічних систем для запобігання аварій, виникає необхідність урізання фінансування соціальних програм, що скорочує середню тривалість життя людини і знижує її якість [68].

Прийнятний рівень ризику має базуватись на економічних і соціальних показниках. Тобто, ризик є прийнятним, якщо його величина настільки незначна, що заради отриманої при цьому вигоди, суспільство готове піти на ризик. В усіх промислово розвинених країнах існує стійка тенденція застосування концепції прийнятного ризику, але політика України, більш ніж в інших країнах, заснована на концепції абсолютної безпеки.

На першому етапі оцінки прийнятності рівня економічного ризику розглядають лише ті шкідливі наслідки, які приводять до смертельних наслідків, оскільки для цього показника досить надійні статистичні дані [69].

Таким чином, головна увага при визначенні соціального ризику повинна бути спрямована на аналіз співвідношення шкідливих соціальних наслідків, що закінчуються смертельними випадками, і кількісної оцінки як сумарного шкідливого соціального впливу, так і його компонентів [70].

Приклад визначення прийнятного ризику представлений на рисунку 1.5.

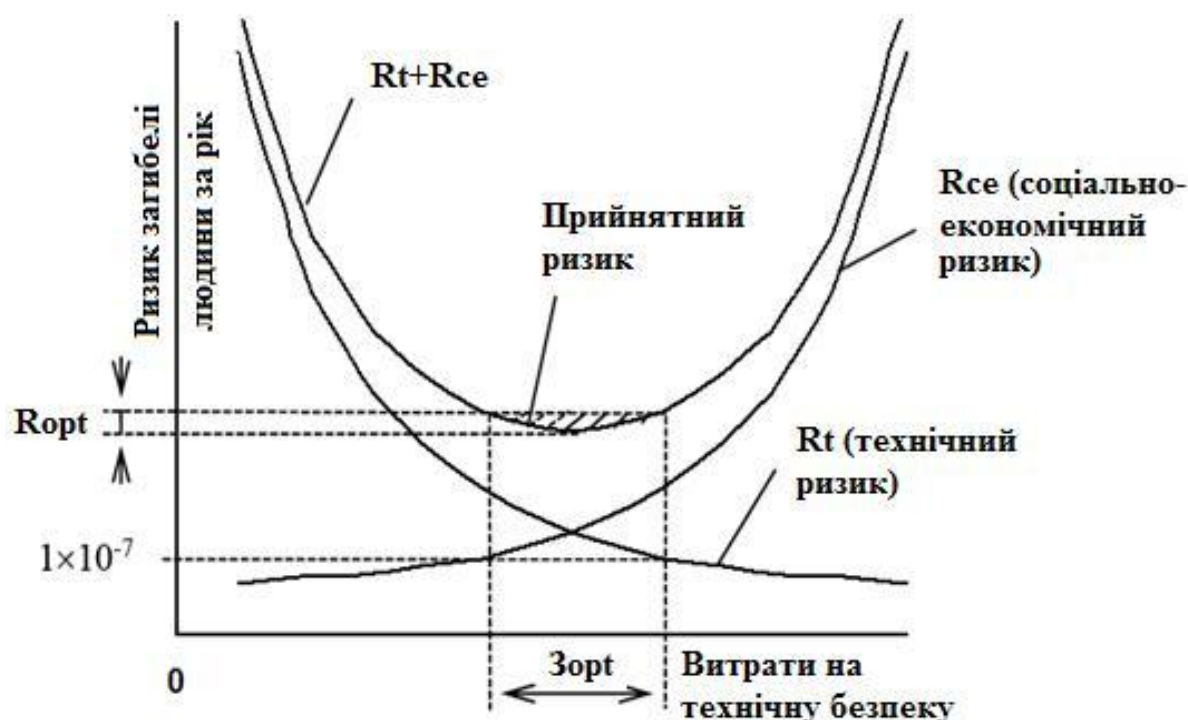


Рис. 1.5 Визначення прийнятного ризику

При збільшенні витрат на удосконалення устаткування технічний ризик знижується, але зростає соціальний. При виборі рівня прийнятного ризику розглядається такий сумарний ризик, який є мінімальним при визначеному співвідношенні між інвестиціями в технічну і соціальну сферу. Прийнятний ризик сполучає в собі технічні, екологічні, соціальні аспекти і представляє певний компроміс між прийнятним рівнем безпеки і економічними можливостями його досягнення, тобто можна говорити про зниження ризику, але не можна забувати про те, скільки за це прийдеться заплатити [58].

У зв'язку зі складністю розрахунків показників ризику, на практиці часто використовуються методи аналізу і критерії прийнятного ризику, засновані на результатах експериментальних оцінок фахівців. У цьому випадку розглянутий об'єкт звичайно ранжирується за ступенем ризику на чотири групи з високим, проміжним, низьким чи незначним рівнем ризику. При такому підході високий рівень ризику вважається неприйнятним, проміжний вимагає виконання програми робіт зі зменшення рівня ризику, низький вважається прийнятним, а незначний взагалі не розглядається як такий, що заслуговує на увагу.

Таким чином, основною вимогою до вибору критерію прийнятного ризику при проведенні аналізу ризику є не його строгість, а обґрунтованість і визначеність.

#### **1.4 Методи аналізу відмов та ризику аварій**

*Аналіз ризику аварії* – це процес визначення небезпек і оцінки ризику аварії на небезпечному об'єкті для окремих осіб або груп людей, майна або навколишнього природного середовища. Аналіз ризику полягає у використанні всієї доступної інформації для виявлення небезпек і оцінки ризику аварії [71, 72]. Розрізняють три стадії аналізу ризику:

– попередній аналіз: виявлення причин виникнення аварії та ідентифікація носіїв аварійної небезпеки; визначення сценаріїв розвитку аварії;

– виявлення послідовності небезпечних ситуацій, побудова дерев відмов і подій;

– аналіз наслідків: підрахунок кількості небезпечних викидів для кожного варіанта розвитку аварії; вивчення закономірностей поширення уражаючих факторів, що призводять до летальних наслідків; оцінка впливу на здоров'я людей та ушкоджень матеріальних цінностей; висновок про безпеку даного об'єкту на основі порівняння з іншими видами ризику для суспільства в цілому.

Підходи і методи аналізу ризику зображені на рисунку 1.6. Методи можуть застосовуватися ізольовано або на додаток один до одного [73].

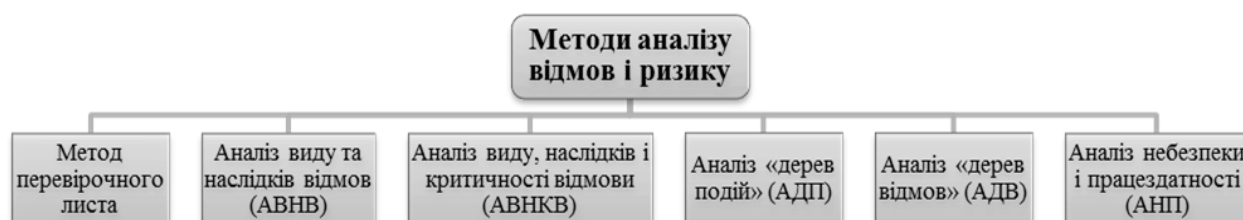


Рис. 1.6 Класифікація методів аналізу відмов та ризиків

1. *Метод перевірного листа* (якісний метод) – являє собою переліки небезпек, ризику або відмов засобів управління, які зазвичай розробляють на основі отриманого раніше досвіду, результатів попередньої оцінки ризику або результатів відмов, що відбулися в минулому. Цей метод може бути використаний як частина інших методів оцінки ризику.

2. *Аналіз виду та наслідків відмов* (якісний метод) – застосовується для якісної оцінки безпеки технічних систем з метою виявлення несправностей, видів і причин відмови. Істотною рисою цього методу є розгляд кожного апарата, установки, блоку, виробу або складової частини системи (елемента) на предмет того, як він став несправним (вид і причина відмови) і який був би вплив відмови на технічну систему.

3. *Аналіз виду, наслідків і критичності відмови* (кількісний метод) – використовується для ідентифікації способів відмови компонентів, систем або процесів, які можуть призвести до невиконання призначеної їм функції. Даний метод допомагає ідентифікувати всі види відмов різних частин і компонентів системи, механізми та наслідки цих відмов, способи досягнення безвідмовної роботи або пом'якшення наслідків для системи, а також дозволяє оцінити критичність і значимість кожного ідентифікованого виду відмови.

4. *Аналіз безпеки і працездатності* – крім ідентифікації небезпек та їх ранжирування дозволяє виявити неясності в інструкціях з безпеки і сприяє їх подальшому вдосконаленню. Недоліки – утрудненість їхнього застосування для аналізу комбінацій подій, що приводять до аварії. Практика показує, що



виникнення і розвиток великих аварій проявляються з різною частотою на різних стадіях аварії (відмови встаткування, людські помилки, зовнішні впливи, викид, пролив речовини, розсіювання речовин, запалення, вибух, інтоксикація). Для виявлення причинно-наслідкових зв'язків між цими подіями використовують логіко-графічні методи аналізу «дерев відмов і подій».

5. *Аналіз дерева відмов* – метод ідентифікації та аналізу факторів, які можуть сприяти виникненню досліджуваної небажаної (кінцевої) події. За допомогою дедукції досліджувані фактори ідентифікують, вибудовують їх логічним чином і представляють на діаграмі у вигляді дерева, яке відображає ці фактори і їх логічний зв'язок з кінцевою подією. Метод дерева відмов може бути використаний для визначення якісної оцінки при ідентифікації причин відмови і шляхів, що призводять до кінцевої події, і кількісної оцінки при обчисленні імовірності кінцевої події, якщо відомі значення імовірностей початкових подій. Аналіз дерева відмов дає наочне представлення шляхів виникнення кінцевої події, дозволяє визначити набір мінімальних перетинів, оцінити імовірності відмови системи для кожного перетину та загальну імовірність кінцевої події.

6. *Аналіз дерева подій* – графічний метод представлення взаємовиключних послідовностей подій, що наступають за появою вихідної події, відповідно до функціонування і нефункціонування систем, розроблених для пом'якшення наслідків небезпечної події. Послідовність подій представляється у вигляді дерева подій і тому за допомогою аналізу дерева подій легко встановити погіршуючі або пом'якшуючі наслідки події, беручи до уваги додаткові системи, функції або бар'єри. Метод аналізу дерева подій надає якісний опис можливих проблем у вигляді комбінацій подій, що представляють собою різні наслідки початкової події, та кількісні оцінки частоти або імовірності появи подій і відносної значущості різних наслідків відмов. Також результатом застосування даного методу є перелік рекомендацій щодо зниження ризику та кількісна оцінка ефективності впровадження цих рекомендацій.

Виділяють 4 групи, яким може бути нанесений збиток від аварії: персонал, населення, навколишнє середовище та матеріальні об'єкти.

Відповідно до методу критичність відмови ( $C$ ) визначається як добуток трьох складових, виражених у шкалах від 1 до 10, які характеризують імовірність виникнення аварійної ситуації ( $B1$ ), вагу її наслідків ( $B2$ ) і імовірність усунення причини аварійної ситуації ( $B3$ ):

$$C = B1 \cdot B2 \cdot B3 \quad (1.3)$$

Недоліками розглянутих методів є відсутність поняття «ваги оцінки», у результаті чого відмови з малими імовірностями виникнення і важкими наслідками та відмови з високими імовірностями виникнення і незначними наслідками мають однакову оцінку критичності ( $C$ ), тобто загальна оцінка не дає реальної картини того, що відбувається.

### **1.5 Аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру**

Одним з основних шляхів підвищення оперативності управління силами відповідних підрозділів та технічними засобами є комплексна автоматизація всіх процесів збору, зберігання, обробки та передачі інформації. Із числа завдань, рішення яких через їхню трудомісткість доцільно покласти на засоби автоматизації, основне місце займають завдання розпізнавання ситуацій, що полягають, у формуванні узагальнених висновків про поточну або прогнозовану ситуацію шляхом аналізу часткових відомостей про обстановку, а також результатів рішення інших завдань розпізнавання [74, 75].

Підвищення оперативності обробки інформації в різних органах управління за рахунок автоматизації рішення завдань розпізнавання натрапляє при розробці автоматизованих систем на ряд труднощів, обумовлених специфічними особливостями завдань цього класу.

Головною з них є так називана відкритість [76, 77, 78] – неможливість складання вичерпного опису і постановки завдання. Відкритий характер завдань розпізнавання обумовлений їхньою високою складністю і збільшується відсутністю адекватних засобів їхньої формалізації. Він проявляється в значній мінливості постановок завдань розпізнавання протягом циклу розробки інформаційних систем, призначених для їхнього рішення [79]. Така мінливість істотно ускладнює розробку ІС, а в деяких випадках робить її взагалі неможливою.

Для того щоб краще усвідомити предмет завдання розпізнавання ситуацій, звернемося до абстрактної постановки завдання прийняття рішень при розпізнаванні ситуацій. У процесі розпізнавання ситуацій повинні вирішуватися наступні завдання [80]:

- ототожнення (ідентифікація) повідомлень, що надходять від джерел інформації, з даними контролю і оцінка приналежності інформаційних ознак до конкретних ситуацій;

- знаходження узагальнених оцінок інформаційних ознак, а так само обробка кількісних і якісних ознак за отриманим даними;

- класифікація ситуацій за об'єднаною інформацією.

У складі повідомлень від джерел інформації присутня, як правило, кількісна і якісна інформація. Практично у всіх ІС при ототожненні повідомлень використовуються, в основному, кількісні дані, тому що вони більше інформативні з погляду просторового розрізнення окремих ОС. Ознакова інформація використовується лише для грубого ототожнення ситуації, а також для заборони ототожнення повідомлень, що істотно відрізняються ознаками.

Завдання знаходження узагальнених оцінок якісних ознак і класифікацій ситуацій традиційно вирішується ОПР з обмеженим використанням засобів автоматизації. При цьому прийняття важливих інформаційних рішень практично завжди є прерогативою людини.

Таким чином, відомі методи і алгоритми об'єднання інформації в ІС не повною мірою використовують ознакову інформацію для ототожнення

повідомлень, а при її узагальненні і прийнятті рішень про типи ситуацій, які мають місце бути, використовують не всю сукупність ознак.

При вирішенні завдання розпізнавання фізичні невизначеності успішно враховувалися за допомогою методів теорії імовірностей. Побудова організаційно-технічних систем, до яких відносяться й автоматизовані системи управління (АСУ), привело до необхідності розширення множини методів розпізнавання такими, які дозволяли б обробляти інформацію, що надходить від людини природною мовою [81].

Інформація про деякі ознаки ОС може бути отримана за рахунок використання органів почуття, знання і досвіду людини, прямо або побічно, шляхом застосування експертних систем [82, 83, 84, 85]. Це змушує, незважаючи на властиві обмеження точності, розглядати людину і системи, що використовують знання, як спеціальні джерела інформації.

Об'єктивною реальністю є існування при рішенні завдання розпізнавання ситуацій неповноти інформації про значення ознак ОС. Це проявляється у вигляді: відсутності значень частини ознак на даний момент часу; багатозначності значень ознак; невідповідності значень ознак дійсності.

Система об'єднання повинна мати і використовувати знання, які можна умовно розділити на дві групи [86, 87]: знання про властивості ОС і джерела інформації, що дозволяють визначати ці властивості; знання про внутрішню структуру сформованої НС і її внутрішні взаємозв'язки. Цим знанням також можуть бути властиві неоднозначність, неповнота і суперечливість.

Таким чином, розглянуте завдання розпізнавання ситуації не може бути формалізоване за допомогою звичайних математичних методів, що опираються тільки на апарат теорії імовірностей і математичної статистики. Тому доцільно сполучати статистичні методи рішення з методами, що дозволяють представляти і обробляти дані і знання спільно.

Наявність великої кількості неформалізуємих факторів, що впливають на результати прийнятих рішень ОПР, робить завдання побудови точної математичної моделі системи і пошуку оптимальних рішень практично

нездійсненним. Вибір конкретної моделі може використатися лише як засіб одержання деякої додаткової інформації про ОС [88, 89]. Людині, зазвичай, важко охопити всі кількісні характеристики ОС, тому необхідно застосовувати методи якісного аналізу, що дозволяють робити узагальнення кількісних характеристик обстановки, що полегшують людині аналіз ситуацій, що виникають у процесі роботи.

Принципова відмінність нового етапу розвитку інформаційно-управляючих систем полягає у використанні методів штучного інтелекту [90, 91, 92, 93] та технології експертних систем і систем підтримки прийняття рішень [94, 95, 96].

Прогрес комп'ютерної технології разом з досягненнями в області моделювання розумової діяльності людини дали нові методологічні можливості в області автоматизації управління. З'явилася принципово нова можливість оперувати в персональних комп'ютерах не тільки з кількісними даними, але й знаннями, отриманими, зокрема, від експертів.

Із проведеного аналізу можна побачити, що повна автоматизація рішення завдання розпізнавання надзвичайних ситуацій техногенного характеру можлива лише на основі використання нової інформаційної технології – технології експертних систем і систем підтримки прийняття рішень у сполученні із традиційними методами рішення часткових завдань. Такий підхід дозволяє використати [97]:

- досвід і можливості ОПР в рішенні розглянутого класу завдань;
- знання висококваліфікованих експертів (фахівців) у розглянутій проблемній області;
- алгоритми рішення окремих завдань, засновані на традиційній технології і добре відпрацьовані на практиці.

На основі нових інформаційних технологій може бути на більш високому рівні автоматизоване рішення наступних завдань: об'єднання різнорідних даних, що надходять від джерел інформації; оцінка ризику аварії; виявлення НС техногенного характеру у зоні відповідальності; класифікація НС техногенного

характеру за ступенем ризику та інтенсивністю по відношенню до об'єктів у зоні відповідальності.

Основні методи розпізнавання ситуацій, об'єктів і явищ, питання системотехнічного характеру по даній проблемі, побудови оптимального простору ознак, оптимізації процесу розпізнавання й оцінки ефективності систем розпізнавання викладені в працях А.Л. Горелика [98].

У роботі [99] запропонована класифікація моделей розпізнавання. У якості основних виділені: статистичні, структурні, логічні моделі розпізнавання, засновані на методах обчислення оцінок.

Статистичні моделі розпізнавання дозволяють обробляти тільки дані зі стохастичною невизначеністю. Системи розпізнавання, побудовані на основі подібних моделей, повинні використовувати дані від джерел інформації, що реалізують статистичні методи обробки сигналів.

У роботі [100] запропонована ідея спільного рішення завдань розпізнавання з використанням різнорідної інформації. Для об'єднання даних від різнотипних джерел запропонована багаторівнева система алфавітів класів, формалізована у вигляді ієрархічного багаторівневого графа. Мережну модель можна задати у вигляді кортежу:

$$S = \langle I, C_1, C_2, \dots, C_n, \Gamma \rangle, \quad (1.4)$$

де  $I$  – множина інформаційних одиниць;  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – множина типів зв'язків між інформаційними одиницями;  $\Gamma$  – відображення між інформаційними одиницями  $I$  і зв'язками із заданого набору.

Розпізнавання із застосуванням методів теорії статистичних рішень дозволяють використати тільки ознаки з імовірнісною мірою невизначеності [101].

Структурні моделі розпізнавання були розвинені з необхідністю рішення завдань розпізнавання зображень, у тому числі і об'ємних. Специфіка області використання даних моделей не дозволяє їх застосувати для рішення розглянутого завдання.

У логічних системах розпізнавання [18, 76, 102, 103] класи і ознаки

розглядаються як логічні змінні, а всі відомості апріорного характеру про класи представляються у вигляді булевих співвідношень. Методи рішення завдання розпізнавання в логічних системах засновані на побудові скороченого базису – таблиці із комбінаціями значень істинності набору логічних елементів. Внаслідок значних обчислювальних витрат, дані методи не можуть бути використані для рішення розглянутого завдання.

Формальна система дозволяє організувати виведення нових фактів у деякій предметній області без урахування особливості поведінки її певних об'єктів, тобто синтаксично, оперуючи тільки символами. Для врахування особливостей певних об'єктів потрібно доповнити аксіоми формальної системи власними (нелогічними) аксіомами формальної теорії та визначити зміст інтерпретації введених на об'єкти позначень.

Поняття інтерпретації для формалізованої теорії, побудованої на основі обчислення висловлювань, нескладне [104, 105]:

- символи формалізованої теорії відповідають висловлюванням про властивості об'єктів певної предметної області;
- логічні операції призначені для поєднання окремих висловлювань.

Формальна система на основі обчислення висловлювань дозволяє побудувати теорії, які описують системи певних тверджень. Недоліком використання висловлювань є їхня статичність в описі предметної області – це функція від довільної кількості елементів, що приймає значення «істинно» або «хибно».

Розширенням логічних моделей розпізнавання став алгебраїчний підхід [106], запропонований Ю.І. Журавльовим, і розроблені на його основі алгоритми обчислення оцінок. Метою алгебраїчного підходу до завдань розпізнавання є одержання алгоритму, що забезпечує виділення із представлених даних всієї корисної інформації і одержання рішення, що повністю відповідає її інформативності. Недоліком таких систем розпізнавання є необхідність роботи з багатомірними матрицями, покладеними в основу формалізованого опису класу. Для існуючих інтелектуальних систем, внаслідок

значної обчислювальної складності, такий алгоритм побудувати неможливо [107, 108].

Для обробки якісної інформації з нестохастичною невизначеністю в роботах [109, 110] були розроблені способи об'єднання в єдину систему множини кінцевих розпізнавальних автоматів. Основна увага, приділяється при цьому методам об'єднання інформації розпізнавання окремих скінчених автоматів на рівні часткових рішень про класи об'єктів (процедури голосування). Обмеженість даних процедур тільки якісною інформацією також не дозволяє їх використовувати для рішення поставленого завдання.

У роботі [111] запропоновано розглядати процес розпізнавання об'єктів як погоджену фільтрацію ситуацій. При цьому пристрій, що вирішує абстрактне завдання розпізнавання, можна розглядати як нелінійний логіко-просторово-часовий фільтр, погоджений з деякою подією – розпізнаваною ситуацією.

У роботах [109, 112] запропоноване використання методів теорії можливостей для розпізнавання образів, що дозволяє обробляти кількісні ознаки з нестохастичною невизначеністю на основі теорії нечітких множин.

Для формалізації нечітких знань, що характеризуються лінгвістичною невизначеністю, застосовується теорія нечітких чи розпливчастих множин. Основи теорії нечітких множин були закладені в 1965р. американським математиком Л.А. Заде [74, 113, 114].

У загальному випадку побудову функції належності здійснюють на основі експертних оцінок [115, 116].

Нечіткі та лінгвістичні змінні дозволяють формулювати нечіткі твердження [117]. Наприклад, «ціль швидко наближається до об'єкта прикриття» чи «якщо ціль рухається на малій висоті із великою інтенсивністю маневру, то це крилата ракета», тощо. Подібні твердження є об'єктом досліджень нечіткої логіки. Важливо відзначити, що на відміну від формальної логіки, яка використовує таблиці істинності, нечітка логіка спирається на операції, що виконуються над нечіткими множинами.

У роботі [118] розроблена методика спільного використання



інформаційних ознак із стохастичною і нестохастичною невизначеністю при розпізнаванні ОС. Для подання експертних знань і опису класів ознаками була використана ієрархічна мережа сценарних фреймів. В основі методу рішення завдання розпізнавання покладені результати неklasичного багатозначного логічного вирахування – логіки присутності [78, 119], апарату теорії нечітких мір (міри Цукамото) і теорії можливостей [120, 121, 122, 123].

У роботі [124] розроблені методи формалізації різнорідних даних про апіорні і поточні значення кількісних і якісних ознак. Якісні ознаки представлялися у вигляді проміжних алфавітів, об'єднаних у багаторівневу систему в загальному випадку незбіжних алфавітів класів. Для кожної ознаки, яка використовується для розпізнавання об'єктів  $i$ -го класу в складі  $q$ -ї групи, експертами визначається закономірність прояву значень ознак у об'єктів певного класу у вигляді нечіткої множини  $N_k^{miq}$  такого вигляду:

$$N_k^{miq} = \{(X_k, \mu^{miq}(X_k))\}, \quad (1.5)$$

де  $\mu^{miq}(X_k)$  – функція належності об'єктів до  $i$ -го класу за значеннями  $X_k^m$  у складі  $q$ -ї альтернативної групи ознак.

Одним з підходів подання знань про закономірність прояву значень кількісних ознак є використання гістограм.

Таке подання, нескладне для розуміння експертів, дозволяє з задовільним ступенем достовірності передавати основні закономірності предметної області і є простим в обробці.

Для побудови гістограми певної ознаки експерт повинен задати ширину інтервалу  $R_{int}^k$  або їх кількість  $K_{int}^k$ . В останньому випадку ширина інтервалу обчислюється відповідно до виразу:

$$R_{int}^k = \frac{X_{k_{max}} - X_{k_{min}}}{K_{int}^k} \quad (1.6)$$

Для кожного інтервалу діаграми експерт має визначити значення міри можливості віднесення об'єкта до певного класу. Функція належності за значеннями кількісних ознак набуває вигляду:

$$\mu^{miq}(X_k) = \begin{cases} \mu_1^{miqk} & | X_k \in [X_{k_{\min}}, X_{k_{\min}} + R_{\text{int}}^k [ \\ \mu_2^{miqk} & | X_k \in [X_{k_{\min}} + R_{\text{int}}^k, X_{k_{\min}} + 2 * R_{\text{int}}^k [ \\ \dots \\ \mu_{K_{\text{int}}^k}^{miqk} & | X_k \in [X_{k_{\max}} - R_{\text{int}}^k, X_{k_{\max}} [ \end{cases}, \quad (1.7)$$

де  $\mu_S^{miqk}$  – значення функції належності об'єкта до  $i$ -го класу алфавіту  $m$ , якщо значення ознаки  $X_k$  у складі  $q$ -ї групи належить інтервалу  $S$ .

Для формалізації закономірності прояву якісних ознак у об'єктів певного класу експерт повинен визначити міру можливості віднесення об'єкта до певного класу для всіх можливих значень певної характеристики. Функція належності за значеннями якісних ознак набуває вигляду:

$$\mu^{miq}(X_k) = \begin{cases} \mu_1^{miqk} & | X_k^m = z_1^{mk} \\ \mu_2^{miqk} & | X_k^m = z_2^{mk} \\ \dots \\ \mu_{z_k}^{miqk} & | X_k = z_{z_k}^k \end{cases} \quad (1.8)$$

У роботі [76] запропоновані методи формалізації даних про значення різнорідних ознак. Запропонована система розпізнавання дозволяє ухвалювати рішення щодо класів ситуацій в умовах неповноти ознак, з урахуванням вірогідності даних, що надходять від джерел інформації з нестохастичною невизначеністю. Рішення про клас об'єкта в розглянутій системі розпізнавання приймався як результат нечіткого виводу на структурі багаторівневої системи алфавітів класів з використанням правила Демпстера-Шейфера [99].

Передбачалося також, що одним з таких незалежних свідчень буде результат розпізнавання ОС за кількісними ознаками. Для оцінки ступеня істинності розпізнаваного класу ситуацій за кількісними ознаками запропоноване використання нечіткої логіки. Визначення ступеня істинності класів здійснювалося з використанням мір можливості і необхідності тверджень, інтерпретацією яких є апріорний і поточний розподіли значень відповідної ознаки. Однак для адекватності опису класів ситуацій кращим виявляється спільне використання кількісних і якісних ознак [115].

Таким чином, для рішення завдання розпізнавання ситуацій в умовах різнорідності, неповноти і суперечливості даних про ознаки існує ряд окремих методів [125]. Жодна з існуючих систем розпізнавання не враховує всіх особливостей розв'язуваного завдання, що породжує необхідність проведення додаткових досліджень. Однак окремі методи і прийоми можуть бути використані для рішення часткових завдань. До них відносяться:

– методи формалізації даних про поточні та апріорні значення кількісних і якісних ознак, запропоновані в роботах [124, 114];

– подання знань про опис класів ознаками в диз'юнктивно-кон'юнктивній формі подібно логічним системам розпізнавання [126].

Аналіз особливостей завдання розпізнавання ТА дозволяє зробити наступні висновки:

1. Завдання може бути вирішене тільки на основі спільної обробки оперативних даних і розрахунково-планової інформації про ОС і знань у розглянутій області.

2. Завдання вирішується, як правило, в умовах неповноти, невизначеності і суперечливості вихідних даних і знань, що використовувалися.

3. Завдання, як правило, не підлягає суворій формалізації на основі традиційних математичних методів, при цьому з погляду постановки завдання воно є відкритим.

4. Завдання відрізняється складністю рішення, більшою кількістю факторів, що впливають на рішення, і багатоваріантністю можливих рішень.

## **1.6 Постановка задачі дослідження**

Проведений у підрозділах 1.1–1.5 аналіз наявних методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру дає змогу зробити висновок про те, що для проведення аналізу ризику, встановлення його припустимих меж у зв'язку з вимогами безпеки і прийняття керуючих рішень

необхідна наявність інформаційної технології, що дозволяє оперативно контролювати існуючі джерела небезпеки і стан об'єктів можливого ураження.

Відомі методи і алгоритми об'єднання інформації в ІС не повною мірою використовують ознакову інформацію для ототожнення повідомлень, а при її узагальненні і прийнятті рішень про типи ситуацій, які мають місце бути, використовують не всю сукупність ознак.

Недоліками розглянутих методів аналізу відмов та ризику аварій є відсутність поняття «ваги оцінки», у результаті чого відмови з малими імовірностями виникнення і важкими наслідками та відмови з високими імовірностями виникнення і незначними наслідками мають однакову оцінку критичності, тобто загальна оцінка не дає реальної картини того, що відбувається.

На сьогодні не існує вузької спеціалізованої інформаційної системи управління ризиками виникнення техногенних аварій на АГЗС. Тому, розробка інформаційної технології для підвищення надійності інформаційної системи АГЗС є актуальною задачею.

Для проведення аналізу ризику, встановлення його припустимих меж у зв'язку з вимогами безпеки і прийняття керуючих рішень необхідна наявність інформаційної технології, що дозволяє оперативно контролювати існуючі джерела небезпеки і стан об'єктів можливого ураження.

Виходячи із цього, метою дисертаційної роботи є розробка моделей і методів зниження ризику виникнення техногенних аварій шляхом створення інформаційної технології, що дозволяє підвищити надійність АГЗС та ефективність управління наслідками техногенних аварій.

Для досягнення мети необхідно вирішити наукове завдання – розробити моделі, методи та інформаційну технологію підвищення надійності об'єкта техногенної небезпеки.

Об'єктом дослідження є процеси аналізу та управління ризиками виникнення техногенних аварій на АГЗС, а предметом дослідження – моделі, методи та інформаційна технологія підвищення надійності АГЗС.

Рішення сформульованого вище наукового завдання доцільно розбити на ряд взаємозалежних складових частин, що визначають часткові завдання досліджень. Основними з цих завдань є:

1. Аналіз моделей управління ризиком виникнення аварій та методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуації техногенного характеру.

2. Розробка методу оцінки імовірності виникнення аварії на АГЗС із застосуванням «дерева відмов» для аналізу ризиків.

3. Удосконалення моделі функціонування АГЗС, на основі використання сценаріїв аварійних ситуацій.

4. Розробка методу оцінки соціального ризику із застосуванням нейронних мереж.

5. Розробка методу подання знань щодо оцінки ризику виникнення техногенних аварій.

6. Розробка інформаційної технології для автоматизації процесів вироблення рішень при управлінні наслідками надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

7. Розробка рекомендацій з використання запропонованих методів.

Рішення показаних вище взаємозалежних часткових завдань визначило структуру та зміст дисертаційної роботи.

## **1.7 Висновки до розділу 1**

Наведено класифікацію надзвичайних ситуацій за видами та статистику їх виникнення. Проведений аналіз показує, що надзвичайні ситуації техногенного характеру здатні в будь-який час нанести серйозну втрату у всіх сферах людської діяльності. Обґрунтовано високий рівень небезпечності АГЗС та наведено огляд та класифікацію критичних ситуацій у їх функціонуванні.

Проведено аналіз моделі управління ризиком виникнення аварій на АГЗС. Розглянуто класифікацію рівнів небезпеки та кількісні показники ризику аварії, які є основою моделі управління ризиком функціонування АГЗС. Для проведення аналізу ризику, встановлення його припустимих меж у зв'язку з вимогами безпеки і прийняття керуючих рішень необхідна наявність інформаційної технології, що дозволяє оперативно контролювати існуючі джерела небезпеки і стан об'єктів можливого ураження.

Розглянуто поняття прийнятного ризику, що сполучає в собі технічні, екологічні, соціальні аспекти і представляє певний компроміс між прийнятним рівнем безпеки і економічними можливостями його досягнення. Встановлено, що основною вимогою до вибору критерію прийнятного ризику при проведенні аналізу ризику є його обґрунтованість і визначеність.

Наведено огляд методів аналізу відмов та ризику аварій. Запропоновано розглядати систему управління безпекою і ризиком як складну ієрархічну структуру, а реалізацію стратегій управління ризиком з метою прийняття управлінських рішень ґрунтувати на сучасних інформаційних технологіях.

Проведено аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Проведений аналіз літератури показав, що при великому різноманітті робіт у досліджуваній предметній області недостатньо проробленими залишаються питання розпізнавання ситуацій і синтезу варіанта рішення з протидії виникненню техногенних аварій на АГЗС. Аналіз діяльності осіб, що приймають рішення при оцінці ризиків виникнення техногенних аварій показав, що при зниженні часу, затрачуваного на роботу пов'язану з пошуком, обробкою й відображенням необхідної інформації, може бути підвищена оперативність рішення завдань оцінки аварійної ситуації.

Аналіз, здійснений у цьому розділі, ґрунтовано на результатах, які автор опублікував у працях [3, 4, 5].

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АГЗС

#### 2.1 Моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на АГЗС

Досить вдалим засобом для забезпечення повного і зваженого функціонального опису ризиків на АГЗС є використання представлення знань про досліджувані об'єкти і системи у вигляді графічних логічних побудов. Так як технологія функціонування АГЗС є досить складною, то для аналізу і оцінки ризиків було використано універсальний метод дослідження дерев відмов. Цей метод був реалізований в інформаційній системі підвищення надійності АГЗС, яка дозволяє автоматизовано приймати ефективні рішення щодо безпечного функціонування АГЗС.

Для оцінки ризику і наслідків аварій, на об'єктах зберігання, переробки і транспортування ЗВГ використовують модель розвитку аварійних ситуацій на АГЗС з метою оцінки наслідків аварійних вибухів паливно-повітряних сумішей (ППС).

При моделюванні аварійних ситуацій передбачається часткова розгерметизація або повне руйнування устаткування, що містить горючі речовини в газоподібній або рідкій фазі, викид цієї речовини в навколишнє середовище, утворення хмари ППС, ініціювання ППС, вибухове перетворення (горіння або детонація) у хмарі ППС. На основі представленої моделі визначаються імовірні ступені ураження людей і ступені uszkodження будинків від вибухового навантаження при аваріях з вибухами ППС.

Модель враховує шість режимів вибухових перетворень хмар ППС: від детонації до дефлаграції зі швидкістю видимого фронту полум'я 100 м/с. Відповідно до обраного режиму вибухового перетворення, а також залежно від маси палива, що утримується в хмарі, і відстані, визначаються

границі зон повних, сильних, середніх і слабких ступенів руйнування будинків і споруджень жилої і промислової забудови. Розрахунки виконуються з використанням моделі оцінки інтенсивності теплових потоків для «вогняної кулі».

Для розрахунку параметрів ударних хвиль при вибуху хмари ППС використовуються наступні вихідні дані [127]: характеристики горючої речовини, що утримується в хмарі; агрегатний стан ППС (газова або гетерогенна суміш); середня концентрація горючої речовини в суміші; стехіометрична концентрація горючого газу з повітрям; маса горючої речовини, що утримується в хмарі; питома теплота згоряння горючої речовини.

Таким чином для розрахунку параметрів вибуху ППС нами рекомендується наступний алгоритм, що містить такі структурні елементи: визначення маси горючої речовини, що утримується в хмарі; визначення ефективного енергозапасу ППС; визначення режиму вибухового перетворення ППС; розрахунок максимального надлишкового тиску та імпульсу фази стиску повітряних ударних хвиль для різних режимів; визначення додаткових характеристик вибухового навантаження; оцінка вражаючого впливу вибуху ППС.

Процес виявлення можливих аварійних ситуацій і побудова сценаріїв їх розвитку в першу чергу полягає у визначенні їх можливих причин. Для визначення характерних факторів небезпеки на потенційно небезпечних об'єктах пропонується загальна схема імовірнісної моделі виникнення і розвитку аварії. В аварійній ситуації на АГЗС виділено три фази:

Фаза 1. Період виникнення аварійної ситуації в межах одного технологічного блоку.

Фаза 2. Розвиток аварії в межах ділянки технологічного блоку і загроза ланцюгового розвитку аварії з виходом за межі локальної ділянки технологічного блоку і залученням в аварійний процес усього технологічного об'єкту (АГЗС).



Фаза 3. Ланцюговий розвиток аварії на рівні АГЗС з можливим руйнуванням будинків і споруд; істотні руйнування і загибель людей можуть відбутися на всій території АГЗС і за її межами.

При роботі з ЗВГ можливі різні аварійні ситуації: з витокм газу або без, із запаленням газу чи без, з виникненням вогню від газу або від зовнішнього джерела, з руйнуванням ємності або без.

Більша частина зареєстрованих аварій при роботі з ЗВГ пов'язані з витокм і запаленням газу та руйнуванням ємності. Такі аварії найбільш драматичні як за результатами вчинених руйнувань, так і відносно смертельного результату [128].

Аналіз аварій, що відбулися, на аналогічних об'єктах дозволяє виділити три взаємозалежні групи причин, що сприяють виникненню і розвитку аварій:

Аналіз аварій, що відбулися, на аналогічних об'єктах дозволяє виділити три взаємозалежні групи причин, що сприяють виникненню і розвитку аварій:

1. *Відмови устаткування* (корозія, фізичне зношування та механічні ушкодження; помилки при проектуванні і виготовленні; старіння металу, не виявлене при огляді; порушення режимів експлуатації).

2. *Помилки персоналу* (при прийомі ЗВГ із автоцистерн; при відпуску ЗВГ споживачам, заправленні газобалонних автомобілів; при відборі проб ЗВГ з резервуарів; при підготовці устаткування до ремонту, при проведенні ремонтних і профілактичних робіт; при пуску і зупинці устаткування; при локалізації аварійних ситуацій) .

3. *Нерозраховані зовнішні впливи природного і техногенного характеру* (штормові вітри і урагани, сніжні замети, зливові дощі, грозові розряди, механічні ушкодження, диверсії).

Для прогнозоної оцінки частоти аварійних ситуацій через відмови технологічного обладнання було використано досвід експлуатації типових вибухопожежонебезпечних модулів і статистичні дані обстеження

аналогічних об'єктів. За даними обстеження були побудовані формалізовані моделі дерев відмов з урахуванням складових небезпек, які використовуються при розрахунках кількісної оцінки аварійних ситуацій.

Аналіз складових АГЗС показує, що на об'єкті можуть виникати аварійні ситуації, викликані руйнуванням автоцистерни, трубопроводу, резервуару, газороздавальної колонки та насосного агрегату (рис. 2.1). Були досліджені реальні аварійні ситуації перелічених сценаріїв, дані яких використовувались в якості вхідної інформації для побудови дерев відмов. Декомпозиція цих небезпек дозволила побудувати моделі причинно-наслідкових зв'язків розвитку сценаріїв прогнозованих небезпек.

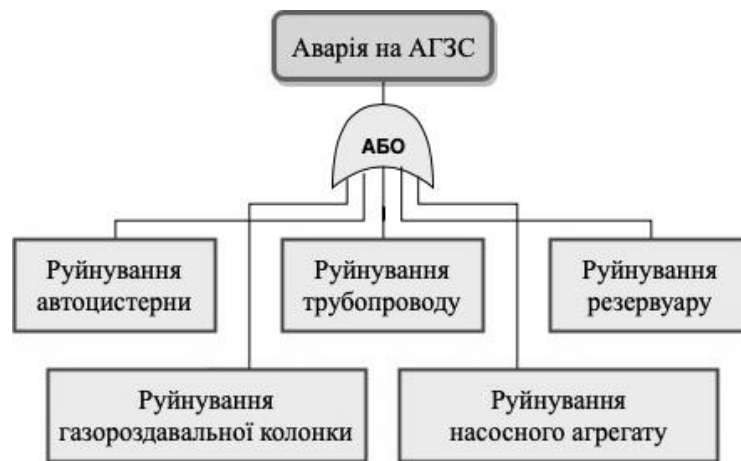


Рис. 2.1 Дерево відмов функціонування АГЗС

На дереві відмов функціонування АГЗС прямокутниками позначено головні події, кожна з яких складається з базових (складових). Причинно-наслідкові відношення визначаються логічними операторами, які відображені відповідними символами.

Для визначення прогнозованого технічного ризику використані величини імовірності вихідних ситуацій, що входять до моделі дерев відмов, включаючи облік відмов обладнання та дані експертних оцінок.

Основні аварійні ситуації на АГЗС пов'язані з руйнуванням (повним або частковим) автоцистерни, ємнісного устаткування, трубопроводів або насосів. Такі руйнування можуть призвести до наступних видів аварійних ситуацій: пожежа проливу, вогняна куля, вибух, спалах. Найбільшу

небезпеку для людей і матеріальних цінностей представляють вражаючі фактори вибуху і вогняних куль: загоряння автомобіля біля паливної колонки; вибух автомобіля; загоряння паливної колонки; загоряння та вибух автоцистерни і резервуарів зі ЗВГ [127, 128].

Можливі сценарії аварійних ситуацій на АГЗС та аналіз умов їх виникнення і розвитку наведені далі у вигляді окремих дерев відмов.

Для кожного зі можливих сценаріїв аварійних ситуацій на АГЗС є декілька подій, які є спільними для всіх сценаріїв, вони були об'єднані в один блок. Цей блок складається з чотирьох подій: природні явища; дефекти конструкцій; зношення устаткування; пожежа на об'єктах АГЗС.

На рисунку 2.2 наведено реалізацію сценарію руйнування автоцистерни, який може призвести до проливу ЗВГ у піддон в результаті розгерметизації автоцистерни, фланцевих з'єднань, штуцерів видачі ЗВГ з автоцистерни, трубопроводів, запірної арматури. Також можливе утворення пароповітряної хмари або загоряння парів ЗВГ усередині автоцистерни, у результаті чого виникне пожежа проливу або вибух.



Рис. 2.2 Дерево відмов при руйнуванні автоцистерни

Трубопровідні системи є джерелом підвищеної небезпеки через велику кількість зварних і фланцевих з'єднань, запірної і регулюючої арматури, жорстких умов роботи і значних обсягів речовин, що перекачуються ними. Розгерметизація та руйнування трубопроводу (рис. 2.3) найчастіше має локальний характер і не призводить до серйозних наслідків. Однак при несвоєчасній локалізації може статися подальший розвиток аварії.



Рис. 2.3 Дерево відмов при руйнуванні трубопроводу

Ємнісне устаткування (резервуари) є джерелом підвищеної небезпеки. Це пов'язано, з великою кількістю ЗВГ, який у них зберігається. Руйнування резервуару (рис. 2.4) може призвести до проливу ЗВГ у його піддон, внаслідок чого виникне пожежа проливу. Також можливі сценарії, пов'язані з утворенням вибухонебезпечних концентрацій ЗВГ всередині резервуару, в результаті чого виникає їх загоряння з подальшим вибухом і утворенням вогняної кулі.

У випадку руйнування елементів газороздавальної колонки (рис. 2.5) може виникати утворення пароповітряної хмари з подальшим її загорянням і можливим вибухом. Також може виникнути загоряння парів ЗВГ або пожежа проливу.

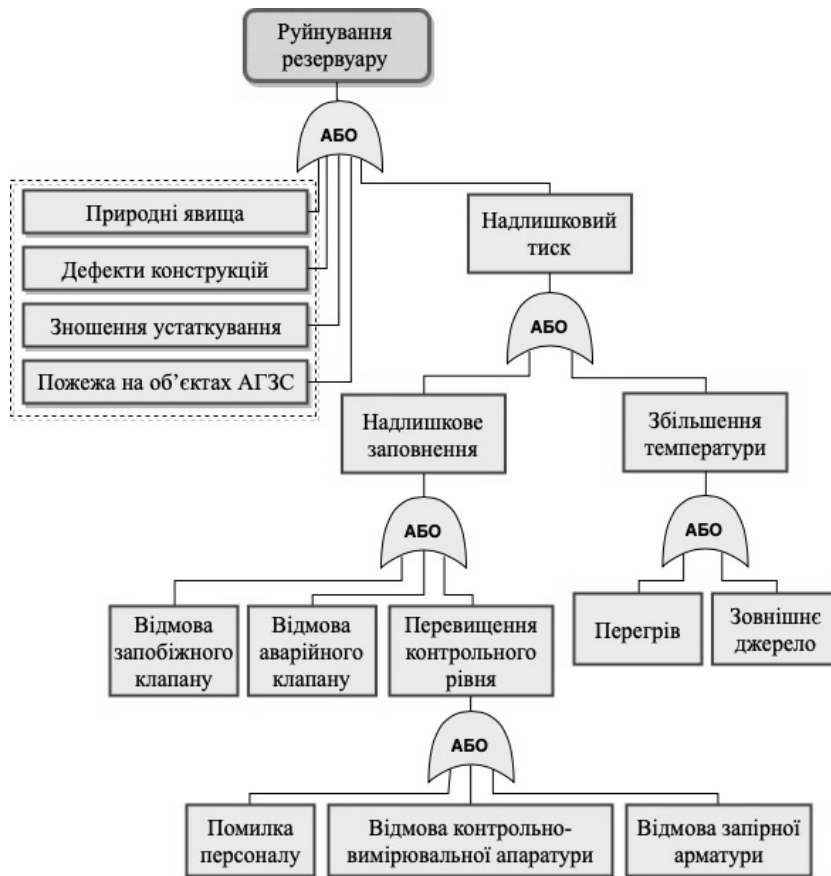


Рис. 2.4 Дерево відмов при руйнуванні резервуару



Рис. 2.5 Дерево відмов при руйнуванні газороздавальної колонки

Аварійна зупинка насосів може привести до порушення гідравлічного і теплового режиму системи і руйнування обладнання

(рис. 2.6). Досвід експлуатації АГЗС показує, що деякі елементи конструкції насосів, наприклад такі як торцеві ущільнення, володіють низьким рівнем надійності.



Рис. 2.6 Дерево відмов при руйнуванні насосного агрегату

Оцінюючи ризик аварії методом дерев відмов виявляються комбінації відмов устаткування, помилок персоналу і зовнішніх (техногенних, природних) впливів, що приводять до основної події – аварійної ситуації. Отримані імовірності реалізації сценаріїв аварії слугують основою для розрахунку показників індивідуального та соціального ризиків. Розрахунок цих ризиків передбачає виконання ряду дій:

- визначення імовірності виникнення ініціюючих подій для можливих основних сценаріїв аварії;
- побудова логічних дерев відмов при виникненні основних ініціюючих аварійних ситуацій;
- визначення статистичних імовірностей переходу аварії на різні гілки дерева відмов;
- визначення умовних імовірностей ураження при реалізації різних гілок дерева відмов.

## 2.2 Модель побудови сценарію небезпечного стану інформаційної системи

Для вирішення питань безпеки АГЗС побудуємо фізичну модель виникнення і розвитку аварії, що ґрунтується на логіко-імовірнісній теорії безпеки. Вона дозволяє виконувати розрахунки ризику виникнення аварій і катастроф структурно складних систем, що базуються на логічному представленні розвитку небезпечних станів і математичних методів обчислення істинності функцій алгебри логіки (ФАЛ). Логіко-ймовірнісні методи дослідження безпеки дозволяють об'єктивно виявити найбільш небезпечні місця та ініціюючі умови. Ініціюючі ознаки (фактори), що впливають на підсумкову подію системи, можуть бути складені арифметично або логічно. Число таких ознак для додавання може бути від декількох одиниць до десятків.

Розглянемо залежність імовірності підсумкової події від імовірностей ознак і їхнього числа, порівняємо результати арифметичного і логічного додавання імовірностей-ознак. Логічна функція додавання подій  $e_1, e_2, \dots, e_n$  записується як:

$$L = e_1 \vee e_2 \vee \dots \vee e_i \vee \dots \vee e_n \quad (2.1)$$

Задача формулюється в такий спосіб: неуспіх відбувається, якщо відбувається яка-небудь одна, які-небудь дві і т.д. чи всі ініціюючі події. Після ортогоналізації логічної функції (2.1) може бути записана наступна імовірнісна функція Й-функція (імовірнісний поліном):

$$P = P_1 + P_2(1 - P_1) + P_3(1 - P_1)(1 - P_2) + \dots + P_n(1 - P_1)(1 - P_2)\dots(1 - P_{n-1}), \quad (2.2)$$

де  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – імовірності подій-ознак  $e_1, e_2, \dots, e_n$

Відзначимо, що для підсумкової події величина  $P$  завжди знаходиться в межах  $[0,1]$  при будь-яких значеннях імовірностей ініціюючих подій  $0 \leq P_i \leq 1; i = 1, 2, \dots, n$ .

Якщо є одна подія-ознака ( $n = 1$ ), то імовірність підсумкової події  $P$  при логічному додаванні (2.2) буде лінійно залежати від імовірності цієї події-ознаки  $P_1$  (рис. 2.7).

Якщо присутні дві ініціюючих події-ознаки ( $n = 2$ ), то при логічному додаванні подій (2.2) імовірність підсумкової події  $P$  буде вже  $S$ -образно залежати від імовірностей подій-ознак, яким додані однакові значення. Крутість  $S$ -залежності збільшується зі зростанням  $n$  [129]. Імовірність підсумкової події при логічному додаванні залежить як від числа подій-ознак, так і від їхньої імовірності. Насичення імовірності ( $P = 1$ ) також залежить від цих факторів. Низькі імовірності ініціюючих подій-ознак, рівні 0.001, забезпечують малий сумарний ризик  $P = 0.02 \div 0.04$ .

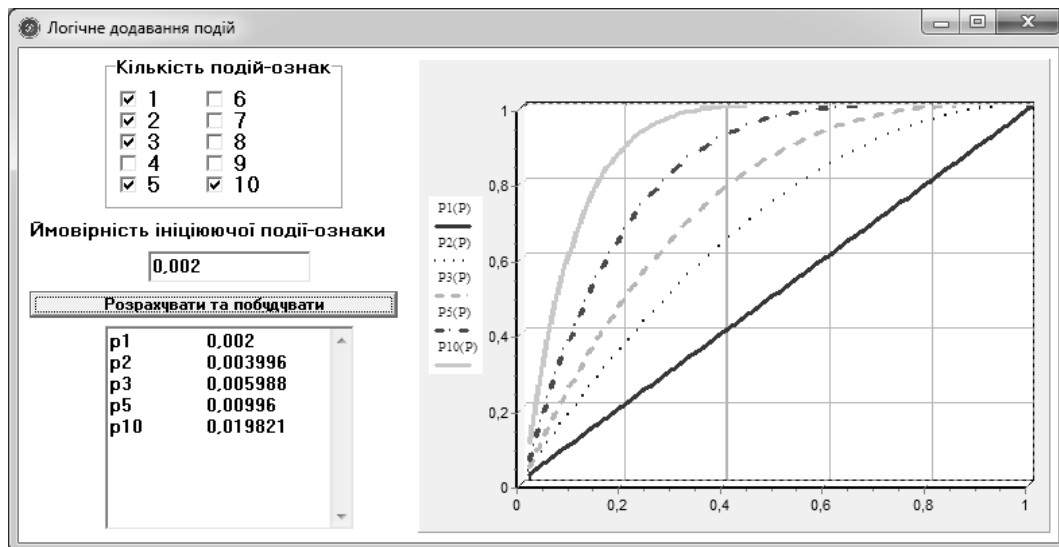


Рис. 2.7 Ризик у функції числа і імовірностей ініціюючих подій при логічному додаванні

Результати порівняння логічного і арифметичного додавання імовірностей подій-ознак представлені на рисунку 2.8 при числі подій-ознак 1, 3, 5 і 10.

При великих значеннях ваг ознак і великому їхньому числі  $n$  імовірність підсумкової події, обчислена як арифметична сума імовірностей, стає абсурдно великою ( $P > 1$ ). Арифметична та логічна суми близькі між собою тільки при малих значеннях імовірностей



ініціюючих подій та малому їхньому числі. Тому методики на основі арифметичного додавання мають задовільну точність тільки при малому числі ознак ( $n = 1 \div 3$ ) і при малих їхніх вагах  $P = 0.001 \div 0.0001; i = 1, 2, \dots, n$ .

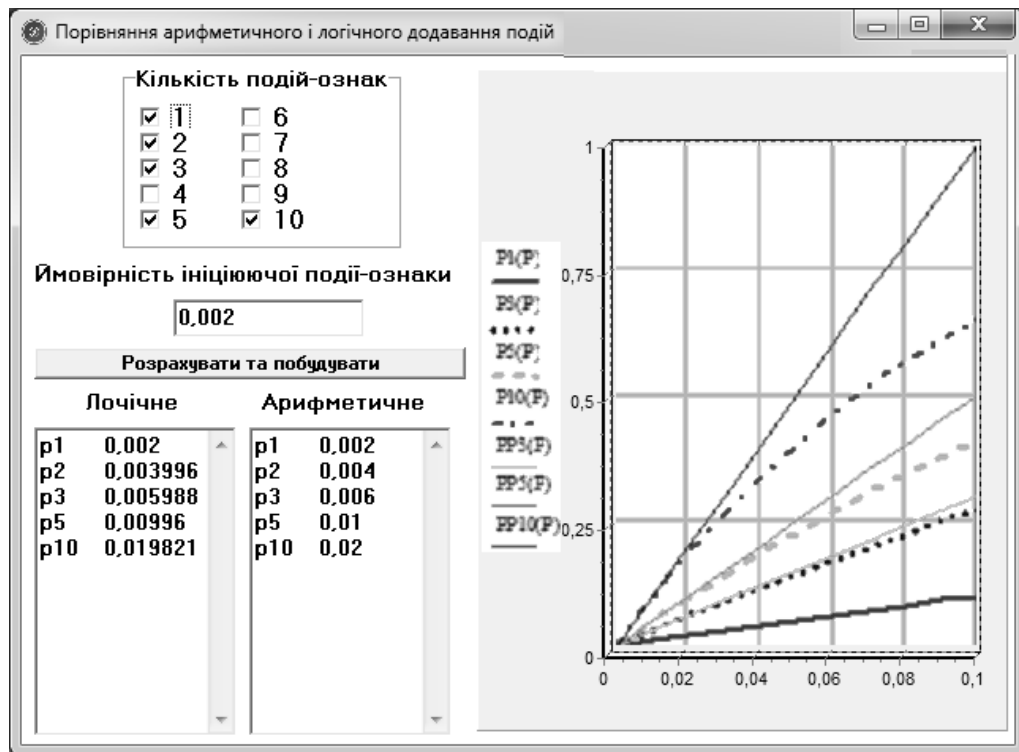


Рис. 2.8 Ризик у функції числа та імовірностей ініціюючих подій при порівнянні логічного і арифметичного додавання

Порівняння поліномів для арифметичного (2.1) та логічного (2.2) додавання показує, що логіко-імовірнісний поліном має більш складну структуру і тому надає великі можливості для адекватного опису ризику вихідної події.

Для складної структури, описуваної ФАЛ довільної форми, перехід від логічної функції ризику (неуспіху) до імовірнісної функції (поліному) пов'язаний з ортогоналізацією логічної функції ризику, записаної в диз'юнктивній нормальній формі, вираз виду  $c_i$ , де  $c_1 \vee c_2 \vee \dots \vee c_i \vee \dots \vee c_n$  – елементарні кон'юнкції різних рангів, називається диз'юнктивною нормальною формою (ДНФ).

Наприклад, функція  $f(e_1, \dots, e_4) = e_1 e_2 \vee e_1 e_2 \bar{e}_3 \vee \bar{e}_1 e_3 e_4$  записана в ДНФ, тому що доданки – елементарні кон'юнкції. Тільки для ортогональної ДНФ

замість змінних  $e_i$  і  $\bar{e}_i$  можна підставляти їхні імовірності  $P_i$  і  $Q_i$ , ( $Q_i = 1 - P_i$ ), замінюючи знак диз'юнкції  $\vee$  на знак операції додавання  $+$ , а знак кон'юнкції  $\wedge$  на знак операції множення  $\cdot$ . Для одержання Й-полінома розглянемо ортогоналізацію логічної функції методом умовних імовірностей для структурної моделі ризику типу «місток» (рис. 2.9). Базові події даної моделі позначимо  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$ , а умову – символом  $|$ .

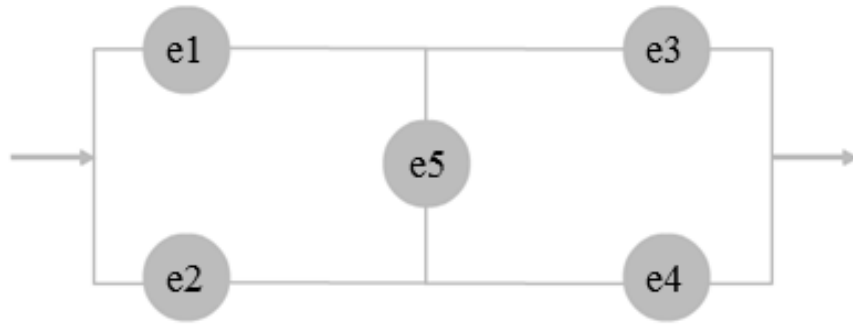


Рис. 2.9 Структурна модель ризику типу «місток»

Тоді  $l = e_1 e_3 \vee e_2 e_4 \vee e_1 e_4 e_5 \vee e_2 e_3 e_5$ ;  $L = c_1 \vee c_2 \vee c_3 \vee c_4$ . Імовірність першого логічного доданка:

$$P\{c_1\} = P_1 P_3 = W_1 \quad (2.3)$$

Імовірність суми перших двох логічних доданків:

$$\begin{aligned} P\{c_1 \vee c_2\} &= P\{c_1\} + P\{c_2\} - P\{c_2\} \cdot P\{c_1 | c_2 = 1\} = \\ &= P_1 P_3 + P_2 P_4 - P_2 P_4 \cdot P\{e_1 e_3 | c_2 = 1\} = P_1 P_3 + P_2 P_4 - P_1 P_2 P_3 P_4 = W_{12} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Імовірність суми перших трьох логічних доданків:

$$\begin{aligned} P\{c_1 \vee c_2 \vee c_3\} &= P\{c_1 \vee c_2\} + P\{c_3\} - P\{c_3\} \cdot P\{c_1 \vee c_2 | c_3 = 1\} = \\ &= W_{12} + P_1 P_4 P_5 - P_1 P_4 P_5 \cdot P\left\{ \begin{array}{l} e_1 e_3 \\ e_2 e_4 \end{array} \middle| c_3 = 1 \right\} = \\ &= W_{12} + P_1 P_4 P_5 - P_1 P_4 P_5 \cdot P\left\{ \begin{array}{l} 1 e_3 \\ e_2 1 \end{array} \right\} = W_{12} + P_1 P_4 P_5 - P_1 P_4 P_5 \cdot P\{\bar{e}_2 \bar{e}_3\} = \\ &= W_{12} + P_1 P_4 P_5 - P_1 P_4 P_5 \cdot (1 - Q_2 Q_3) = W_{12} - P_1 P_4 P_5 Q_2 Q_3 = W_{123} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Тут використане правило заміщення змінних при розгляді умовних імовірностей і теорема де Моргана про заміну диз'юнкції запереченням кон'юнкції. Імовірність суми чотирьох логічних доданків:

$$\begin{aligned}
P\{c_1 \vee c_2 \vee c_3 \vee c_4\} &= P\{c_1 \vee c_2 \vee c_3\} + P\{c_4\} - \\
&- P\{c_4\} \cdot P\{c_1 \vee c_2 \vee c_3 \mid c_4 = 1\} = W_{123} + P_2 P_3 P_5 - \\
&- P_2 P_3 P_5 \cdot P \left\{ \begin{array}{l} e_1 e_3 \\ e_2 e_4 \\ e_1 e_4 e_5 \end{array} \middle| c_4 = 1 \right\} = W_{123} + P_2 P_3 P_5 - \\
&- P_2 P_3 P_5 \cdot P \left\{ \begin{array}{l} e_1 1 \\ 1 e_4 \\ e_1 e_4 1 \end{array} \right\} = W_{123} + P_2 P_3 P_5 - P_2 P_3 P_5 \cdot P \left\{ \begin{array}{l} e_1 \\ e_4 \end{array} \right\} = \\
&= W_{123} + P_2 P_3 P_5 - P_2 P_3 P_5 \cdot (1 - Q_1 Q_4) = W_{123} - P_2 P_3 P_5 Q_1 Q_4 = W_{1234}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Вище послідовно використовувалися правило заміщення змінних при розгляді умовних імовірностей, закон поглинання і теорема де Моргана про заміну диз'юнкції запереченням кон'юнкції [130].

Зробивши підстановки замість  $W_1, W_{12}, W_{123}$ , одержимо остаточний вираз для І-полінома:

$$\begin{aligned}
P\{L=1\} &= W_{123} + P_2 P_3 P_5 Q_1 Q_4 = W_{12} - P_1 P_4 P_5 Q_2 Q_3 + P_2 P_3 P_5 Q_1 Q_4 = \\
&= P_1 P_3 + P_2 P_4 - P_1 P_2 P_3 P_4 - P_1 P_4 P_5 Q_2 Q_3 + P_2 P_3 P_5 Q_1 Q_4
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Функцію, записану у вигляді матриці, в якій кон'юнкції позначаються розташуванням логічних символів у рядку, а диз'юнкції – їхнім розташуванням у стовпці, називають логічною матрицею. До логічних матриць застосовні усі відомі перетворення алгебри логіки. Так, переміщувальний закон кон'юнкції допускає перестановку символів у рядку, а переміщувальний закон диз'юнкції – перестановку рядків логічної матриці. Нехай ФАЛ має вигляд:

$$f(e_1, \dots, e_8) = \{ \{ e_1 \wedge e_3 \wedge [e_5 \vee (e_4 \wedge e_6 \wedge e_8)] \} \vee \{ e_2 \wedge e_4 \wedge [e_3 \wedge e_5 \wedge e_8] \} \} \wedge e_7 \tag{2.8}$$

У матричній формі рівняння (2.8) можна представити у вигляді:

$$f(e_1, \dots, e_8) = \left| \begin{array}{l} e_1 e_3 \\ e_2 e_4 \\ e_3 e_5 e_8 \end{array} \middle| e_5 \right| e_7 \left| \begin{array}{l} e_1 e_3 e_5 e_7 \\ e_1 e_3 e_4 e_6 e_8 e_7 \\ e_2 e_4 e_6 \\ e_2 e_4 e_3 e_5 e_8 e_7 \end{array} \right| \tag{2.9}$$

АГЗС – це складна система, що складається з устаткування, датчиків, комп'ютерів, програм, інструкцій і дій людини, що включають управління, випробування, ремонт і обслуговування.

Розглянемо побудову логіко-імовірнісної моделі ризику, у якій елементами є також дії людини (помилка оператора). Це моделювання, оцінка і аналіз ризику вибуху резервуара із ЗВГ на АГЗС, події, що характеризує сценарій виникнення великомасштабної аварії – вибуху резервуара, наслідками якого можуть бути забруднення навколишнього середовища, виникнення вогняної кулі, пожежа протоки.

Сценарій небезпечного стану приведений на рисунку 2.10. Складання такого сценарію є творчою частиною аналізу безпеки, найбільш трудомісткою і неформалізованою [131].

Вибух обов'язково відбудеться, якщо буде підвищений тиск у резервуарі через несправність насоса чи надмірне навантаження (події  $e_1, e_2, e_3, e_4$ ) і відмову запобіжного клапану (події  $e_5, e_6, e_7$ ). ФАЛ має вигляд:

$$f(e_1, \dots, e_7) = [(e_1 \wedge e_2) \vee (e_3 \vee e_4)] \wedge [(e_5 \wedge e_6) \vee e_7] \quad (2.10)$$

Причини вибуху на нижньому рівні дерева подій  $e_1 \div e_7$  є ініціюючими умовами і вважаються незалежними випадковими подіями.

При побудові дерева небезпечного стану (рис. 2.10) події розташовуються за рівнями (явище досліджується «зверху вниз»: спочатку формулюється небезпечний стан (вибух), а потім визначається його можливі причини).

Головна (кінцева) подія займає верхній – 0-й рівень, нижче розташовуються події 1-го рівня (серед них можуть бути і початкові), потім 2-го рівня і т.д. Якщо на 1-му рівні міститься одна чи кілька початкових подій, об'єднаних логічним символом АБО, то можливий безпосередній перехід від початкової події до аварії. За кожним небезпечним станом системи аналізується відмова її елементів чи ланцюжків відмов доти, доки не буде знайдена найперша відмова: вихід з ладу єдиного вузла чи помилки людини.

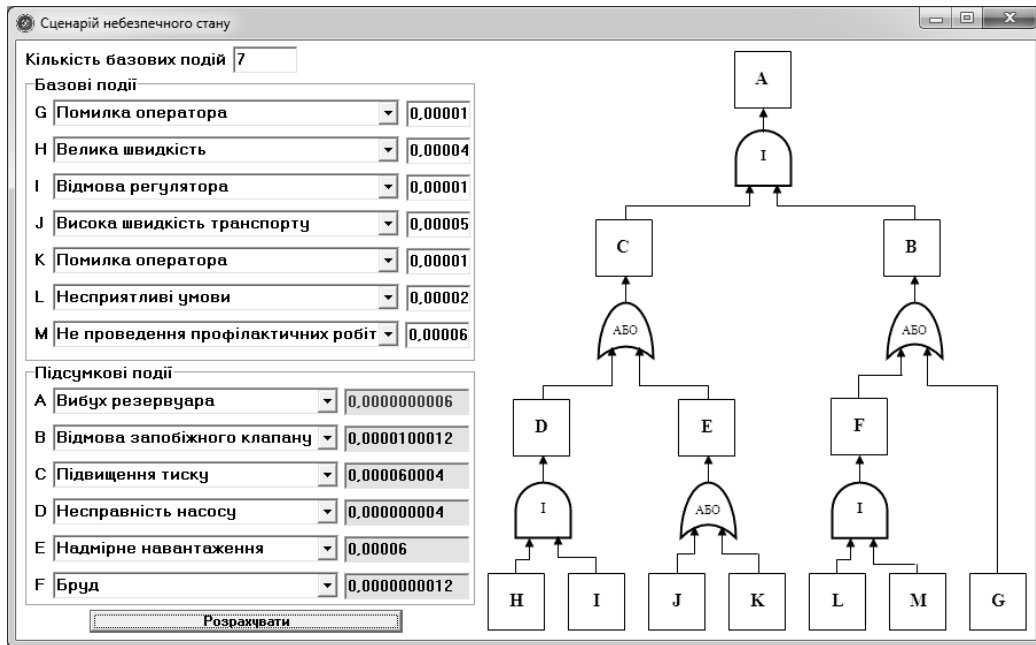


Рис. 2.10 Сценарій небезпечного стану

Потім визначаються мінімальні аварійні сполучення (найменший набір вихідних подій, при якому виникає подія у вершині) і мінімальну траєкторію для побудови дерева. Мінімальними аварійними сполученнями є події  $D$  і  $F$ ,  $D$  і  $G$ ,  $E$  і  $F$  чи  $E$  і  $G$ . Повна сукупність мінімальних аварійних сполучень дерева являє собою усі варіанти сполучень подій, при яких може виникнути аварія. Мінімальна траєкторія – це найменша група подій, без появи яких аварія не відбувається. Наприклад, вибух резервуара із ЗВГ не відбудеться, якщо не підвищиться тиск і не відбудеться відмова запобіжного клапану. Мінімальні траєкторії являють собою події, що є критичними для підтримки об'єкта в безпечному стані. Первинні події і події, що не розкладаються, з'єднані з подією 0-го рівня маршрутами. Складне дерево має різні набори вихідних подій, при яких досягається подія у вершині, які називаються аварійними сполученнями.

Функцію небезпечного стану можна записати у вигляді логічної матриці подій:

$$f(e_1, \dots, e_7) = \begin{vmatrix} e_1 e_2 & e_5 e_6 \\ e_3 & e_7 \\ e_4 & \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

Після розкриття дужок (логічного перемножування) одержимо функцію небезпечного стану у вигляді шести найкоротших шляхів небезпечного функціонування:

$$f(e_1, \dots, e_7) = \begin{array}{|l} e_1 e_2 e_5 e_6 \\ e_1 e_2 e_7 \\ e_3 e_5 e_6 \\ e_3 e_7 \\ e_4 e_5 e_6 \\ e_4 e_7 \end{array} \quad (2.12)$$

Для розглянутого прикладу функція небезпечного стану не містить повторних аргументів, тому, минаючи ортогоналізацію, знайдемо імовірність вибуху з виразу (2.11):

$$P_A = [1 - Q_3 \cdot Q_4 \cdot (1 - P_1 \cdot P_2)] \cdot [1 - Q_7 \cdot (1 - P_5 \cdot P_6)] \quad (2.13)$$

В даній моделі було розглянуто сценарій небезпечного стану, що складався зі статистично незалежних базових подій. Але на реальні системи частіше мають вплив взаємозалежні базові події, тому є доцільним виконати кількісне дослідження таких систем.

### **2.3 Удосконалена модель та механізм функціонування інформаційної системи АГЗС для підвищення надійності**

Якщо елементи взаємодіють у такий спосіб, що перехід в аварійний стан кожного з них приводить до аварійної відмови системи, то з'єднання називають послідовним (рис. 2.11 а). Безаварійний стан системи в цьому випадку може розглядатися як випадкова подія, рівна перетину (добутку) незалежних подій – безаварійної роботи кожного з елементів. Якщо елементи взаємодіють за схемою послідовного з'єднання, то показники безпечної роботи системи нижче відповідних показників кожного з її елементів. Зі збільшенням числа елементів показники системи швидко

падають і, якщо число елементів велике, то неможливо створити систему, що володіє високою безпекою [132]. Одним зі способів підвищення безпеки систем є метод резервування, що полягає у введенні в систему додаткових елементів чи підсистем понад кількість, мінімально необхідну для виконання заданих функцій (як це зроблено на рис. 2.11 б), наприклад, включення в систему, крім основного, додаткового насоса.

Найпростіший спосіб резервування показаний на рисунку 2.11 в. Замість одного елемента, достатнього для виконання визначених функцій, система складається з  $n$  елементів. Передбачається, що аварійні відмови елементів – незалежні події, а відмова системи відбувається в тому випадку, якщо відмовлять усі  $n$  елементів. імовірність переходу системи в аварійний стан дорівнює добутку імовірностей відмов її елементів. Функція безпеки системи  $S(t)$  в цьому випадку буде дорівнювати:

$$S(t) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - S_k(t)], \quad (2.14)$$

де  $S_k(t)$  – функції безпеки кожного з елементів.

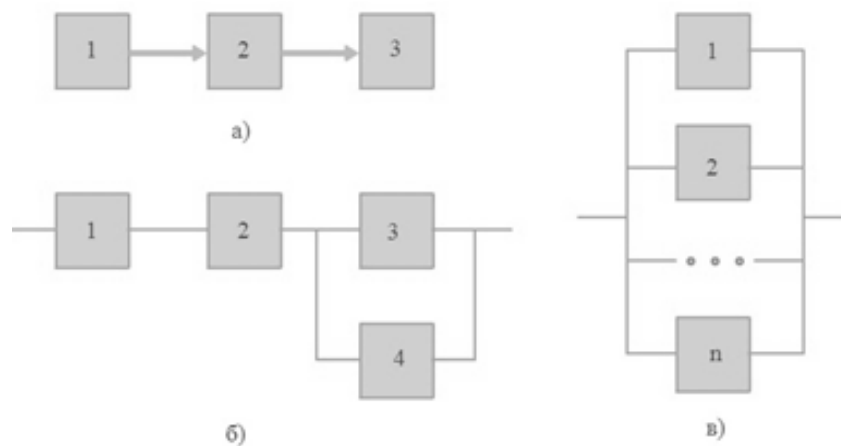


Рис. 2.11 Структурні схеми найпростіших систем при розрахунку технічного ризику

Взаємозалежні базові події на дереві помилок можуть бути в таких випадках:

1. Резервування заміщенням. Включення до складу системи елементів устаткування, що резервують основне устаткування, спрямовано

на підвищення імовірності безвідмовної роботи системи і її коефіцієнта готовності. При цьому у випадку відмови основного елемента замість нього підключається елемент, що до цього знаходився в резерві, так що система в цілому зберігає працездатність. Таким чином, відмова основного компонента приводить до того, що резервний компонент стає більш схильним до відмов, тому що з ненавантаженого чи частково навантаженого стану він переходить у навантажений стан. А це, у свою чергу, означає, що відмова деякого одного елемента змінює характеристики безвідмовності деяких інших компонентів системи, так що відмови компонентів перестають бути статистично незалежними подіями.

2. Загальні причини. Загальна причина, така як, наприклад, пожежа, може привести до одночасної відмови великої кількості елементів. Таким чином, при наявності загальних причин відмов відмову окремих компонентів не можна більше розглядати як статистично незалежні події.

3. Рівнобіжне навантаження компонентів. Припустимо, що деяка група компонентів системи спільно протистоїть дії деякого навантаження, таких як, наприклад, ударний вплив чи проходження електричного струму, тощо. У цьому випадку відмова одного з елементів цієї групи приводить до підвищення навантаження на інші елементи, так що вони, у свою чергу, стають у більшій мірі схильні до відмов. У цьому випадку відмова компонентів, що представляють розглянуту групу, також не може розглядатися як статистично незалежні події.

4. Взаємовиключні базові події. Розглянемо таку пару базових подій: «відмова замикання контактів вимикача» і «відмова розмикання контактів вимикача». Ці дві базових події є взаємовиключними, тому що настання однієї з цих подій приводить до неможливості настання іншої. Отже, взаємовиключні події на дереві помилок також не можна розглядати як статистично незалежні події.

Принцип вмикання – вимикання, використовуваний разом з моделлю Маркова, дає можливість здійснити кількісне дослідження систем, опис



яких включає залежні базові події [133]. Узагальнена процедура кількісного дослідження систем з використанням принципу включення і моделі Маркова полягає в наступному: представити параметри системи на основі використання принципу вмикання – вимикання. Для кожного члена в представленні параметрів системи визначити, чи включає він залежні базові події. Якщо член складається тільки з незалежних базових подій, то виконати його кількісний опис методом, викладеним вище. У зворотному випадку виконати наступні кроки:

1. Промоделювати залежні базові події марковською діаграмою переходів. Побудувати систему диференціальних рівнянь щодо імовірності станів.

2. Виконати кількісний опис членів, що містять залежні базові події, вирішуючи відповідні системи диференціальних рівнянь.

3. Таким чином, до цього моменту маємо кількісний опис усіх членів, що входять у представлення параметрів системи на основі застосування принципу вмикання – вимикання. Визначити перші і другі наближення, а також нижні і верхні границі значень параметрів системи. Якщо це можливо, то виконується розрахунок значень параметрів системи за розгорнутими формулами і визначаються їхні точні значення.

Розглянемо залежності між базовими подіями, введенням у систему резервування, заміщенням і дією загальних причин. Системи при взаємозалежності базових подій, викликаними іншими факторами, досліджують аналогічно.

Дерево помилок, зображене на рисунку 2.12, містить п'ять мінімальних перетинів:  $g_1 = \{C\}$ ,  $g_2 = \{E\}$ ,  $g_3 = \{H\}$ ,  $g_4 = \{A, B\}$ ,  $g_5 = \{F, G\}$ .

Головна подія може бути виражена через події  $g_i$ :

$$S = \bigcup_{i=1}^{N_C} g_i, \quad (2.15)$$

де  $N_C$  – загальне число мінімальних перетинів.

Відмову  $Q_s(t)$  системи обчислимо через число мінімальних перетинів за виразом:

$$Q_s(t) = \sum_{i=1}^{N_c} \Pr(g_i) - \sum_{i=2}^{N_c} \sum_{j=1}^{i-1} \Pr(g_i \cap g_j) + \dots + (-1)^{N_c-1} \Pr(g_1 \cap g_2 \cap \dots \cap g_{N_c}) \quad (2.16)$$



Рис. 2.12 Дерево помилок для системи охолодження і очищення побіжного газу

Для великих і складних дерев помилок обчислення точних значень відмов вимагає великих витрат часу. Часто можна обмежитися найпростішим розрахунком верхньої і нижньої границь відмов. Аналіз виразу (2.16) дає можливість безпосередньо побудувати нерівність, тобто визначити ці границі:

$$\sum_{i=1}^{N_c} \Pr(g_i) - \sum_{i=2}^{N_c} \sum_{j=1}^{i-1} \Pr(g_i \cap g_j) \leq Q_s(t) \leq \sum_{i=1}^{N_c} \Pr(g_i) \quad (2.17)$$

Розглянута система містить насоси  $A$  та  $B$ , один з яких знаходиться в резерві, а другий, який є основним, працює.

Припустимо, що в деякий момент часу  $t$  насос  $A$  працює, а насос  $B$  знаходиться в резерві. У випадку настання відмови насоса  $A$  замість нього включається в роботу насос  $B$ , що знаходився в резерві, так що система в

цілому зберігає працездатність. Насос А, що відмовив, ремонтується і після закінчення ремонту переводиться в резерв. Введення в систему додаткових елементів за такою схемою підвищує безвідмовність системи в цілому.

При введенні в систему резервування заміщенням кожен елемент може знаходитися в одному з трьох станів: у резерві, у ремонті чи в роботі. Відмова компонента може відбутися в тому випадку, якщо відповідний компонент знаходиться в роботі або в резерві. В залежності від відмовних характеристик компонентів у різних станах резервування заміщенням поділяється на такі три типи:

1. Навантажене резервування. Інтенсивність відмов компонента не залежить від того, знаходиться компонент у роботі чи в резерві. Оскільки кожен компонент має власну інтенсивність відмов, на яку не впливає стан інших компонентів системи, навантажене резервування приводить до статистичної незалежності відмов компонентів, що входять у групу резервування.

2. Ненавантажене резервування. Допускається, що відмова компонента не може настати, якщо відповідний компонент знаходиться в резерві. З компонентами зв'язується ненульова інтенсивність відмов, тільки якщо відповідні компоненти знаходяться в роботі. Відмова основного компонента приводить до переведення резервного компонента з резерву в роботу, тобто до стрибкоподібної зміни інтенсивності відмов, пов'язаної з відповідним компонентом. Таким чином, характеристики відмови одного компонента залежать від стану інших компонентів, що як не навантажене резервування служить причиною взаємозалежності базових подій відмови (відмови компонентів).

3. Часткове навантаження резервування. Допускається, що компонент, який знаходиться в резерві, також може відмовити, але інтенсивність відмов компонента при перебуванні його в резерві більш низька, ніж коли він знаходиться в роботі. Відмовні характеристики одного

компонента залежать від стану інших компонентів системи, так що часткове навантаження резервування також служить причиною взаємозалежності від стану інших компонентів системи. Таким чином, часткове навантажене резервування також служить причиною взаємозалежності базових відмовних подій [134].

Застосування принципу вмикання-вимикання дозволяє визначити верхню і нижню границі коефіцієнта неготовності системи (відмови системи):

$$\begin{aligned} Q_S(t)_{\max} &= \text{перше наближення} = \\ &= \Pr(C) + \Pr(E) + \Pr(H) + \Pr(A \cap B) + \Pr(F \cap G) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} Q_S(t)_{\min} &= Q_S(t)_{\max} - \text{друге наближення} = Q_S(t)_{\max} - \\ &- \Pr(C \cap E) - \Pr(C \cap H) - \Pr(C \cap A \cap B) - \Pr(C \cap F \cap G) - \\ &- \Pr(E \cap H) - \Pr(E \cap A \cap B) - \Pr(E \cap F \cap G) - \\ &- \Pr(H \cap A \cap B) - \Pr(H \cap F \cap G) - \Pr(A \cap B \cap F \cap G) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Події  $C, E, H, A \cap B, F \cap G$  є взаємонезалежними за визначенням. З урахуванням цього вираз (2.19) можна записати у формі:

$$\begin{aligned} Q_S(t)_{\min} &= Q_S(t)_{\max} - \Pr(C)\Pr(E) - \Pr(C)\Pr(H) - \\ &- \Pr(C)\Pr(A \cap B) - \Pr(C)\Pr(F \cap G) - \Pr(E)\Pr(H) - \\ &- \Pr(E)\Pr(A \cap B) - \Pr(E)\Pr(F \cap G) - \Pr(H)\Pr(A \cap B) - \\ &- \Pr(H)\Pr(F \cap G) - \Pr(A \cap B)\Pr(F \cap G) \end{aligned} \quad (2.20)$$

При цьому, що рівності

$$\begin{aligned} \Pr(A \cap B) &= \Pr(A)\Pr(B) \\ \Pr(F \cap G) &= \Pr(F)\Pr(G) \end{aligned} \quad (2.21)$$

характерні тільки для випадку навантаженого резервування, а для ненавантаженого і частково навантаженого резервування вони не виконуються.

Застосуємо метод марковських процесів для аналізу систем з постійними інтенсивностями відмов і відновлень.

Величина  $\lambda$  має назву умовної інтенсивності потоку відмов і дорівнює імовірності того, що за безвідмовної роботи протягом терміну  $t$

аварія відбудеться у подальшому короткотривалому інтервалі часу. Практика показує, що після короткотривалого початкового періоду експлуатації функція  $\lambda(t)$  досить довго залишається стабільною, тобто  $\lambda(t) = \lambda = 0$ .

Аналогічним чином визначається величина  $\mu$  – умовна інтенсивність потоку відновлень після моменту  $t$  за одиницю часу за умови, що до моменту  $t$  відновлення елемента не відбулося.

Нехай  $x(t) = 1$ , якщо компонент знаходиться в непрацездатному стані, а  $x(t) = 0$ , якщо компонент знаходиться в працездатному стані.

Для визначення умовної інтенсивності потоку відмов  $\lambda$  можна застосувати наступну систему виразів:

$$\begin{aligned} P(1|0) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 1 | x(t) = 0] = \lambda(\Delta t) \\ P(0|0) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 0 | x(t) = 0] = 1 - \lambda(\Delta t) \\ P(1|1) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 1 | x(t) = 1] = 1 - \mu(\Delta t) \\ P(0|1) &\equiv \Pr[x(t + \Delta t) = 0 | x(t) = 1] = \mu(\Delta t) \end{aligned} \quad (2.22)$$

де  $\Pr[x(t + \Delta t) = 1 | x(t) = 0]$  – імовірність того, що відмова станеться протягом інтервалу часу  $t + \Delta t$  за умови, що компонент працездатний у момент часу  $t$  і т.д.

Величини  $P(1|0)$ ,  $P(0|0)$ ,  $P(1|1)$ ,  $P(0|1)$  називаються перехідними імовірностями [135] (переходи між станами показані на рисунку 2.13).

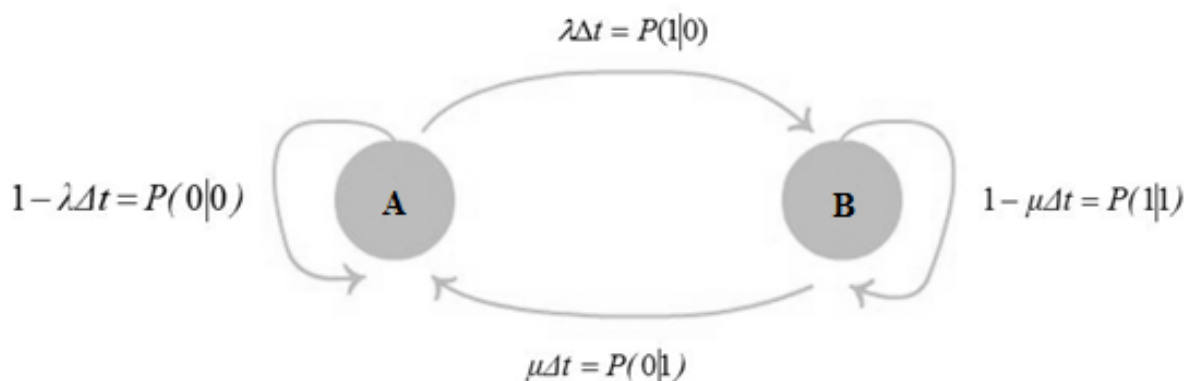


Рис. 2.13 Марковський граф станів: А – працездатний стан;

В – непрацездатний стан

Імовірністю відмови системи є імовірність того, що  $x(t + \Delta t) = 1$ . Цю імовірність, у свою чергу, можна виразити в термінах двох можливих станів  $x(t)$  і відповідних переходів до стану  $x(t + \Delta t) = 1$ .

$$Q(t + \Delta t) = \Pr[x(t + \Delta t) = 1] = P(1|0) \cdot \Pr[x(t) = 0] + P(1|1) \cdot \Pr[x(t) = 1] = \\ = \lambda(\Delta t)[1 - Q(t)] + (1 - \mu(\Delta t)) \cdot Q(t)$$

Останнє рівняння можна переписати у вигляді:

$$Q(t + \Delta t) = \lambda(\Delta t) - \lambda(\Delta t)Q(t) + Q(t) - \mu(\Delta t)Q(t)$$

Звідки знаходимо:

$$\frac{dQ}{dt} = -(\lambda + \mu) \cdot Q(t) + \lambda \quad (2.23)$$

з наступними початковими умовами  $Q(0) = 0$ .

Рисунок 2.14 відображає поведінку системи (введення в систему додаткових елементів понад мінімально необхідну кількість), що складається з елементів  $A$  і  $B$ . Кожен прямокутник на цьому рисунку відтворює один стан такої системи. Крайня ліва клітка в кожному з прямокутників призначена для вказівки резервного компонента, середня клітка – для вказівки основного компонента, а крайня права клітка – для вказівки компонента, що знаходиться тепер у ремонті. Отже, прямокутник 1 показує стан, у якому компонент  $B$  є резервним, а компонент  $A$  – основним. Аналогічно прямокутник 4 відтворює стан, у якому компонент  $B$  є основним, а компонент  $A$  знаходиться в ремонті. Можливі переходи станів на рисунку відтворюються стрілками. Переходи зі стану 1 у стан 3 і зі стану 2 у стан 4 характерні тільки для частково навантаженого і навантаженого резервування; для ненавантаженого резервування ці переходи не мають місця.

У випадку частково навантаженого чи навантаженого резервування допускається, що відмова резервних компонентів характеризуються постійною інтенсивністю  $\bar{\lambda}$ . При навантаженому резервуванні  $\bar{\lambda}$  вважають таким, що дорівнює  $\lambda$  – інтенсивності відмови основного компонента. При ненавантаженому резервуванні  $\bar{\lambda}$  дорівнює нулю.

Особливими випадками частково навантаженого резервування ( $0 < \bar{\lambda} < \lambda$ ) є ненавантажене резервування ( $\bar{\lambda} = 0$ ) і навантажене резервування ( $\bar{\lambda} = \lambda$ ). Інтенсивність відновлення всіх компонентів у системі однакова і дорівнює  $\mu$ . При всіх типах резервування, розглянутих вище, вважається, що система відмовила, якщо вона перейшла в стан 5.

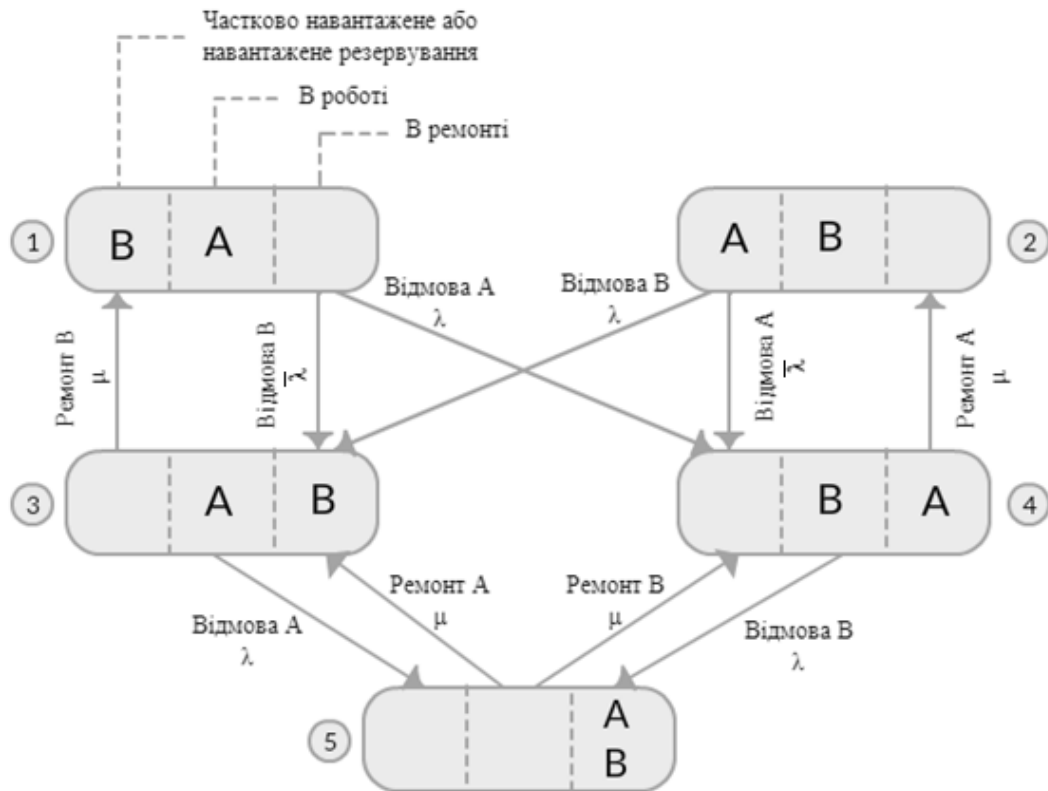


Рис. 2.14 Марковський граф переходів при резервуванні

Позначимо через  $P_i(t)$  імовірність того, що система знаходиться в стані  $i$  у момент часу  $t$ . Похідна цієї імовірності знаходиться за наступним виразом:

$$\begin{aligned}
 P'(t) &= \text{інтенсивність потоку переходів у стан } i - \\
 &- \text{інтенсивність потоку переходів зі стану } i = \\
 &= \sum_j (\text{інтенсивність переходу зі стану } j \text{ у стан } i) \times \\
 &\times \text{ймовірність настання стану } j - \\
 &- \sum_j (\text{інтенсивність переходу зі стану } i \text{ у стан } j) \times \\
 &\times \text{ймовірність настання стану } i
 \end{aligned}$$

Використання приведенного виразу щодо розглянутої системи дає можливість побудувати таку систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 P_1' &= -(\lambda + \bar{\lambda})P_1(t) + \mu P_3(t) \\
 P_2' &= -(\lambda + \bar{\lambda})P_2(t) + \mu P_4(t) \\
 P_3' &= \bar{\lambda}P_1(t) + \lambda P_2(t) - (\lambda + \mu)P_3(t) + \mu P_5(t) \\
 P_4' &= \bar{\lambda}P_2(t) + \lambda P_1(t) - (\lambda + \mu)P_4(t) + \mu P_5(t) \\
 P_5' &= \lambda P_3(t) + \lambda P_4(t) - 2\mu P_5(t)
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Перше рівняння в (2.24) відображає той факт, що інтенсивність потоку, спрямованого від стану 3 до стану 1, дорівнює  $\mu$ , а інтенсивності потоків, спрямованих від стану 1 до станів 3 і 4, дорівнюють відповідно  $\lambda$  і  $\bar{\lambda}$ . Аналогічно отримані і інші рівняння.

Припустимо, що розглянута система в момент часу нуль знаходиться в стані 1, тобто в момент часу нуль обидва компоненти працездатні, причому компонент  $B$  знаходиться в резерві, а компонент  $A$  – у роботі. На основі цього припущення можна так визначити початкові умови для диференціальних рівнянь (2.24):

$$P_1(0) = 1; P_i(0) = 0; i = 2, \dots, 5 \tag{2.25}$$

Склавши перше рівняння системи (2.24) із другим і третє рівнянням з четвертим, одержимо:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_0}{dt} &= -(\lambda + \bar{\lambda})P_0 + \mu P_1 \\
 \frac{dP_1}{dt} &= (\lambda + \bar{\lambda})P_0 - (\lambda + \mu)P_1 + 2\mu P_2 \\
 \frac{dP_2}{dt} &= \lambda P_1 - 2\mu P_2
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

з початковими умовами  $P_0(0) = 1; P_1(0) = P_2(0) = 0$ , де  $P_0 = P_1(t) + P_2(t); P_1 = P_3(t) + P_4(t); P_2 = P_5(t)$ .

Система диференціальних рівнянь (2.26) описує систему, граф переходів якої містить три стани – (0), (1) і (2) (рис. 2.15). Інтенсивність



поток переходів, що виходить зі стану (0), дорівнює  $\lambda + \bar{\lambda}$ , а інтенсивність вхідного потоку –  $\mu$ .

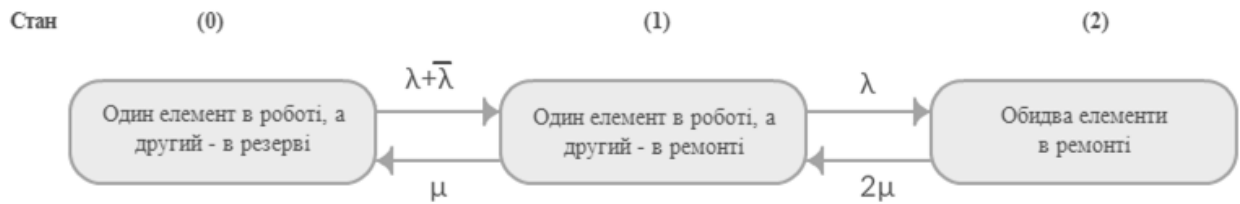


Рис. 2.15 Спрощений марковський граф переходів при резервуванні системи

На рисунку 2.16 показані залежності імовірності відмови елементів  $\{A, B\} \cdot (Qr(t) = \Pr(A \cap B))$  від часу і чисельно рівні імовірності того, що обидва компоненти  $A$  і  $B$  знаходяться в ремонті (крива  $Qr$  – частково навантажене резервування при значеннях  $\lambda = 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\bar{\lambda} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ ; крива  $QrN$  – навантажений стан при значеннях  $\bar{\lambda} = 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ ; крива  $QrNN$  – ненавантажене резервування при значеннях  $\lambda = 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\bar{\lambda} = 0$ ;  $\mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ ).

Аналіз результатів чисельного рішення системи (2.26)  $Qr(t) = P_2(t)$  показує, що при навантаженому резервуванні імовірність відмов вище, ніж при частково навантаженому, а при частково навантаженому – вище, ніж при ненавантаженому резервуванні.

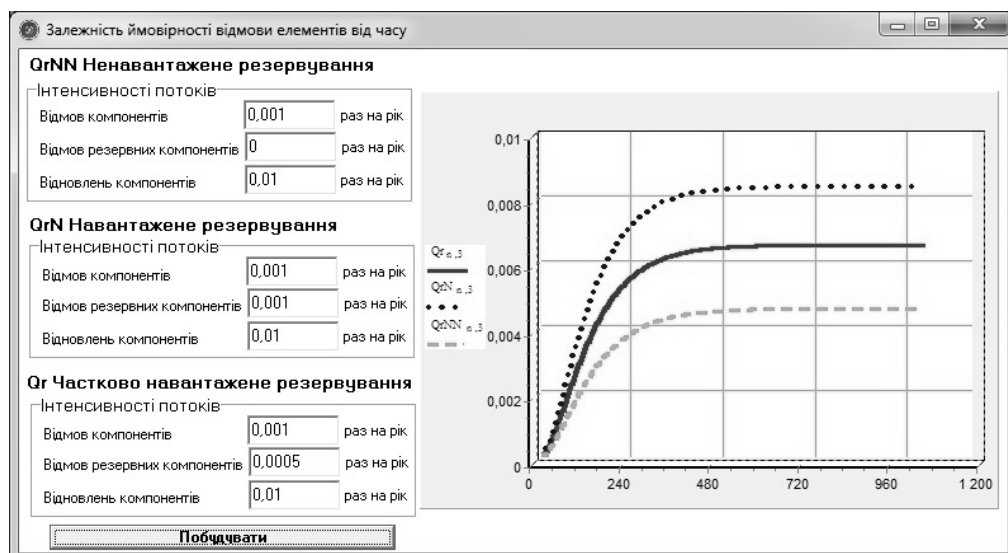


Рис. 2.16 Залежності імовірностей відмови елементів  $A$  і  $B$  від часу

Обчислимо імовірність відмови системи в цілому. Прийнемо для насосів охолоджуючого пристрою інтенсивності відмов  $\lambda = 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\bar{\lambda} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ ; (частково навантажене резервування), а для насосів, що забезпечують циркуляцію пари в газоочисній колоні  $\lambda = 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\bar{\lambda} = 0$ ;  $\mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$  (ненавантажене резервування). Інтенсивності відмов і відновлень для компресора  $C$ , насоса подачі води  $E$  і фільтра  $H$  є наступними:  $\lambda^* = 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ ;  $\mu^* = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Чисельне вирішення задачі (2.26) дає наступні значення імовірностей відмов (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Імовірності відмов системи

$t$	<b>100</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>
$Qr(t)$	0,0028024	0,0064155	0,006479
$QrNN(t)$	0,0018982	0,0044707	0,0045245
$Q(t)$	0,0062948	0,0098375	0,0099006
$Q_S(t)_{\max}$	0,023585	0,040399	0,40705
$Q_S(t)_{\min}$	0,023372	0,039758	0,040055

Імовірності відмов для компресора  $C$ , насоса подачі води  $E$  і фільтра  $H$  можна обчислити за рівнянням:

$$Q(t) = \Pr(C) = \Pr(E) = \Pr(H) = \frac{\lambda^*}{\lambda^* + \mu^*} \cdot \{1 - \exp[-(\lambda^* + \mu^*) \cdot t]\} \quad (2.27)$$

Залежність (2.27) є рішенням диференціального рівняння (2.23):

$$\frac{dQ}{dt} = -(\lambda + \mu) \cdot Q(t) + \lambda \quad (2.28)$$

яке описує марковський граф станів працездатності і непрацездатності компонента при постійних значеннях інтенсивностей відмов і відновлень [136].

Застосовуючи перетворення Лапласа, маємо:

$$Q(p) = -(\lambda + \mu)Q(p) + \frac{\lambda}{p}; \quad Q(p)[p + (\lambda + \mu)] = \frac{\lambda}{p}$$

Звідки

$$Q(p) = \frac{\lambda}{p[p + (\lambda + \mu)]} = \frac{A}{p} + \frac{B}{p + (\lambda + \mu)}$$

Звідки

$$\lambda = Ap + A(\lambda + \mu) + Bp$$

Вирішуючи систему

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ A(\lambda + \mu) = \lambda \end{cases}$$

Знаходимо

$$A = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}; \quad B = -\frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

Остаточно знаходимо

$$Q(p) = \frac{\lambda}{p} - \frac{\lambda}{p + (\lambda + \mu)} \rightarrow \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t] \quad (2.29)$$

Імовірність відмови системи в цілому обчислюється як:

верхня межа відмови

$$Q_S(t)_{\max} = 3 \cdot Q(t) + Qr(t) + QrNN(t) \quad (2.30)$$

нижня межа відмови

$$\begin{aligned} Q_S(t)_{\min} = & Q_S(t)_{\max} - 3 \cdot Q(t)^2 - 3 \cdot Q(t) \cdot Qr(t) - \\ & - 3Q(t) \cdot QrNN(t) - Qr(t) \cdot QrNN(t) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Розглянемо тепер систему, де насоси охолоджувального пристрою включені за схемою «2 з 3». Припустимо, що інтенсивність відмов кожного з насосів охолоджувального пристрою дорівнює  $\lambda$ , коли відповідний насос у роботі, і  $\bar{\lambda}$ , коли він у резерві.

Граф переходів для цієї системи зображений на рисунку 2.17. Стан (0) відповідає такій ситуації, коли два насоси знаходяться в роботі і один – у резерві. Стан (0) відповідає трьом підстанам (1, 2, 3), кожний з яких може перейти в стан (1), причому інтенсивності відповідних переходів однакові і складають  $2\lambda + \bar{\lambda}$ . Інтенсивність переходу зі стану (0) у стан (1) задається

виразом:

$$(2\lambda + \bar{\lambda})P_1 + (2\lambda + \bar{\lambda})P_2 + (2\lambda + \bar{\lambda})P_3 = (2\lambda + \bar{\lambda})(P_1 + P_2 + P_3) = (2\lambda + \bar{\lambda})P_0$$

Це означає, що інтенсивність переходу зі стану (0) у стан (1) дорівнює  $(2\lambda + \bar{\lambda})$ , що і показано на рисунку 2.17. Інтенсивності інших переходів можна визначити аналогічно.

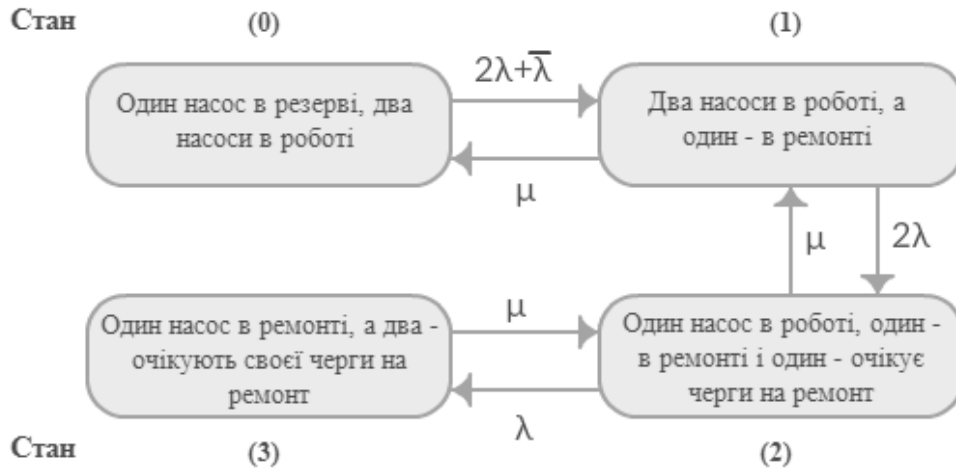


Рис. 2.17 Спрощений марковський граф переходів при резервуванні заміщенням за схемою «2 з 3»

Графу переходів, що зображений на рисунку 2.17, відповідає наступна система диференціальних рівнянь [137]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= -(2\lambda + \bar{\lambda})P_0 + \mu P_1 \\ \frac{dP_1}{dt} &= (2\lambda + \bar{\lambda})P_0 - (2\lambda + \mu)P_1 + \mu P_2 \\ \frac{dP_2}{dt} &= 2\lambda P_1 - (\lambda + \mu)P_2 + \mu P_3 \\ \frac{dP_3}{dt} &= \lambda P_2 - \mu P_3 \end{aligned} \tag{2.32}$$

при початкових умовах  $P_0(0) = 1$ ;  $P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = 0$ .

В результаті рішення цієї системи диференціальних рівнянь можна визначити імовірності станів  $P_i$ .

Для забезпечення працездатності необхідно, щоб працездатними були не менш ніж два з трьох насосів охолоджувального пристрою, що є в

наявності. Таким чином, значення параметра  $Qr(t)$  для охолоджувального пристрою розглянутої системи, що дорівнює імовірності того, що «менше, ніж два насоси охолоджувального пристрою працездатні», задається наступним виразом:  $Qr(t) = P_2(t) + P_3(t)$ .

Чисельне рішення задачі (2.32) дає наступні значення імовірностей відмов (рис. 2.18) ( $\lambda = 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\bar{\lambda} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ ;  $\mu = 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ ).

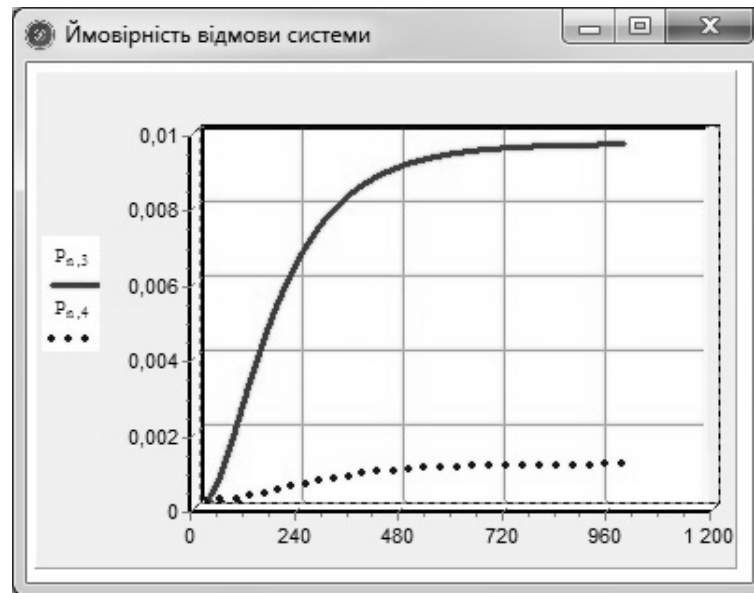


Рис. 2.18 Залежності імовірностей  $P_2(t)$  і  $P_3(t)$  при рішенні системи (2.32)

Дерево помилок для системи охолодження і очищення побіжного газу при резервуванні заміщенням за схемою «2 з 3» (рис. 2.19) має сім мінімальних перетинів відмов:

$$\{C\}, \{E\}, \{H\}, \{A, B\}, \{B, D\}, \{D, A\}, \{F, G\}.$$

Значення верхньої і нижньої межі імовірності відмови системи:

$$Q_s(t) = \Pr\{C \cup E \cup H \cup [(A \cap D) \cup (B \cup D) \cup (D \cap A)] \cup (F \cap G)\} \quad (2.33)$$

Дотримуючись викладеної вище методики, обчислимо імовірність відмови системи (табл. 2.2).

Імовірність відмови системи для моменту часу 1000 годин лежить у межах  $0.0744064 \leq Q_s(t) \leq 0.076274$ .

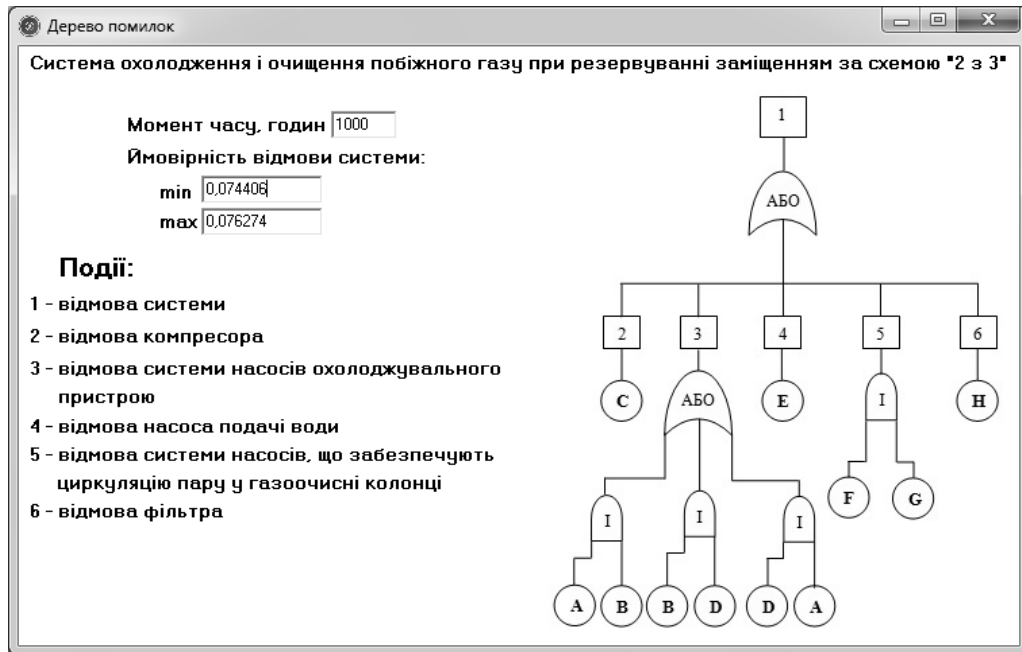


Рис. 2.19 Дерево помилок для системи охолодження і очищення побіжного газу при резервуванні заміщенням за схемою «2 з 3»

Таблиця 2.2

#### Імовірності відмов системи

$t$	100	500	1000
$P_2(t)$	0,011429	0,036325	0,038238
$P_3(t)$	0,000357	0,003330	0,003810
$Q_r(t)$	0,011786	0,039655	0,042048
$Q_s(t)_{\max}$	0,032569	0,073638	0,076274
$Q_s(t)_{\min}$	0,032169	0,071868	0,074406

У загальному випадку резервування заміщенням повинне задовольняти наступним умовам [138]:

1. Ланцюг містить  $n$  ідентичних компонентів.
2. Для забезпечення працездатності ланки необхідно, щоб не менше  $m$  компонентів ланки були працездатні ( $1 \leq m \leq n$ ).
3. У кожен момент часу можуть оновлюватися не більше, ніж  $r$  компонентів ланки.

Ланцюг за схемою « $(m \text{ з } n)$ » описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dP_0}{dt} &= -\lambda_0 P_0 + \mu_1 P_1 \\ \frac{dP_k}{dt} &= -\lambda_{k-1} P_{k-1} - (\lambda_k + \mu_k) P_k + \mu_{k+1} P_{k+1}, \\ \frac{dP_n}{dt} &= -\lambda_{n-1} P_{n-1} - \mu_n P_n\end{aligned}\quad (2.34)$$

де:

$$\lambda_k = m\lambda + (n - m - k) \cdot \bar{\lambda}, \quad 0 \leq k \leq n - m$$

$$\lambda_k = (n - k) \cdot \lambda, \quad n - m + 1 \leq k \leq n - 1$$

$$\mu_k = \min\{r, k\} \cdot \mu, \quad 1 \leq k \leq n$$

Значення  $Qr(t)$  обчислюється за виразом:  $Qr(t) = P_{n-m+1}(t) + \dots + P_n(t)$ .

Розглянута вище система (2.26) є окремим випадком системи (2.34) при  $n=2, m=1, r=2$ , а система (2.32) випадком системи (2.34) при  $n=3, m=2, r=1$ .

Модель марковських процесів є адекватним методом для аналізу відмовостійкості систем. Цей метод добре працює разом з деревами відмов – відомим інструментом надійності.

Отримані розрахунки наближеного значення показника надійності (імовірності відмови системи) дозволяють проводити аналіз відмов технічних систем з метою підвищення надійності їх функціонування.

## 2.4 Висновки до розділу 2

Запропоновано метод оцінки імовірності виникнення аварії на АГЗС, із застосуванням «дерева відмов» для аналізу територіального, індивідуального і соціального ризиків. При оцінці ризику аварії методом «дерев відмов» виявлені комбінації відмов устаткування, помилок персоналу і зовнішніх впливів, що приводять до аварійної ситуації. Виконано моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на АГЗС на основі аналізу умов їх виникнення і розвитку та побудовано «дерево відмов»

функціонування АГЗС. Отримані імовірності реалізації сценаріїв аварії стали основою для розрахунку показників територіального, індивідуального і соціального ризиків.

Побудована фізична модель виникнення і розвитку аварії, що ґрунтується на логіко-імовірнісній теорії безпеки. Вона дозволяє виконувати розрахунки ризику виникнення аварій і катастроф структурно складних систем, що базуються на логічному представленні розвитку небезпечних станів. Логіко-імовірнісні методи дослідження безпеки дозволяють об'єктивно виявити найбільш небезпечні місця та ініціюючі умови.

Удосконалено модель функціонування інформаційної системи автомобільної газозаправної станції на основі використання сценаріїв аварійних ситуацій, що дозволяє оцінити імовірність відмови системи та підвищити її надійність. Модель марковських процесів є адекватним методом для аналізу відмовостійкості систем, який добре працює разом з деревами відмов. Отримані розрахунки наближеного значення імовірності відмови інформаційної системи дозволяють проводити аналіз відмов систем з метою підвищення їх надійності.

Результати, подані в розділі, автор опублікував у працях [6, 7, 8, 9, 10].



## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ ВИНИКНЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ НА АГЗС

#### **3.1 Метод оцінки соціального ризику на основі використання нейронних мереж**

На значення соціального ризику впливають як фізичні параметри вибухонебезпечних речовин, так і проміжні значення ймовірностей ураження людей і ушкодження споруд. Доцільним є визначення відстані, на якій буде досягтися прийнятний рівень соціального ризику ( $10^{-7}$ ). При цьому слід виконати такі етапи:

- формалізувати структуру задачі і визначити набір параметрів, які будуть використані для навчання нейронної мережі;

- з метою збору даних для навчання нейронної мережі виконати моделювання аварійних сценаріїв на АГЗС на наборі вхідних параметрів, вибраному на попередньому етапі;

- провести навчання нейронної мережі з використанням даних, отриманих на попередньому етапі;

- за допомогою нейронної мережі визначити відстань, на якій буде досягтися прийнятний рівень соціального ризику для будь-якого нового набору вхідних параметрів, поданих на вхід нейронної мережі.

Параметри задачі, які необхідно подавати на входи нейронної мережі, повинні повною мірою відображати структуру задачі, тому вибрано наступні основні параметри задачі, опис яких наведено у таблиці 3.1.

Для наведених у таблиці 3.1 параметрів може бути застосований механізм оцінки соціального ризику на основі нейронної мережі.

Параметри з таблиці 3.1 були подані у якості вхідних даних для побудови нейронної мережі (додаток Б, рис. Б.1).

## Основні параметри задачі

Параметр	Опис
V	Загальний об'єм пропану, м <sup>3</sup>
Fp	Площа можливого проливу, м <sup>2</sup>
m1	Загальна маса пари пропану, кг
E	Ефективний енергозапас, Дж
$\Delta P(100)$	Надлишковий тиск на відстані 100 м, кПа
I(100)	Питомий імпульс на відстані 100 м, кПа·с
Pror1(100)	Імовірність пошкодження стін промислових будівель на відстані 100 м без їх знесення
Pror2(100)	Імовірність руйнування промислових будівель, при якому вони належать знесенню на відстані 100 м
Pror3(100)	Імовірність тривалої втрати керованості у людей, що потрапили в зону дії ударної хвилі при вибуху хмари ППС на відстані 100 м
Pror4(100)	Імовірність розриву барабанних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі на відстані 100 м
Pror5(100)	Імовірність відкидання людей хвилею тиску на відстані 100 м
D	Ефективний діаметр «вогняної кулі», м
ts	Час існування «вогняної кулі», с
Pr(100)	Імовірність виникнення вогняної кулі на відстані 100 м
Rport1(100)	Імовірність ураження від опіку першого ступеню на відстані 100 м
Rport2(100)	Імовірність ураження від опіку другого ступеню на відстані 100 м
Rport3(100)	Імовірність ураження від опіку третього ступеню на відстані 100 м

Навчання і побудова нейронної мережі реалізована засобами аналітичної платформи *Deductor Studio Academic*. Навчання нейронної мережі здійснювалося по спеціально створеному набору даних, отриманому із 10000 задач.

Спочатку було виконано аналіз якості вхідних даних (додаток Б, рис. Б.2). Одне поле (Rport1(100) – імовірність ураження від опіку першого ступеню на відстані 100 м) містить однакові значення і є неприродним, тому воно не використовувалось для навчання нейронної мережі.

Для інших полів було виконано попередню обробку значень за допомогою редагування викидів. Після цього було виконано аналіз даних для з'ясування полів, які можуть бути використані у якості входів нейронної мережі.

За результатами аналізу вихідних даних було встановлено, що для навчання нейронної мережі є сенс використовувати не всі поля, а лише наведені в таблиці 3.2, адже решта полів на результуюче значення впливають несуттєво.

## Вхідні дані для навчання нейронної мережі

Параметр	Опис
V	Загальний об'єм пропану, м <sup>3</sup>
Fp	Площа можливого проливу, м <sup>2</sup>
m1	Загальна маса пари пропану, кг
E	Ефективний енергозапас, Дж
ΔP(100)	Надлишковий тиск на відстані 100 м, кПа
I(100)	Питомий імпульс на відстані 100 м, кПа·с
D	Ефективний діаметр «вогняної кулі», м
ts	Час існування «вогняної кулі», с
Pr(100)	Імовірність виникнення вогняної кулі на відстані 100 м

Серед множини вихідного набору даних було обрано співвідношення між навчальною та тестовою множиною даних (додаток Б, рис. Б.3).

Отриманий набір даних був використаний для навчання нейронної мережі виду багатошаровий перцептрон. Була встановлена наступна структура нейронної мережі: п'ять шарів нейронів (перший вхідний шар містить 9 нейронів, три проміжних шари містять 7, 5 і 3 нейрони відповідно, і п'ятий вихідний шар містить 1 нейрон), функція активації – сигмоїда (додаток Б, рис. Б.4). Було обрано алгоритм навчання та його початкове налаштування (додаток Б, рис. Б.5). Завершення навчання відбувається при досягненні граничного значення відхилення розпізнавання або при досягненні встановленої епохи навчання нейронної мережі (додаток Б, рис. Б.6).

У процесі навчання нейронної мережі максимальне відхилення для навчальної множини становило значення порядку  $10^{-2}$ , а для тестової множини –  $10^{-3}$ , при цьому середнє відхилення для обох множин не перевищувало значення  $10^{-4}$  (додаток Б, рис. Б.7).

Схематично структура нейронної мережі представлена на рис. 3.1, колір ліній відображає значення вагового коефіцієнта. Вихідними даними для нейронної мережі є відстань, на якій досягається значення прийнятного рівня соціального ризику. Подавши на вхід нейронної мережі параметри іншої задачі, на виході отримуємо прогнозну відстань, на якій буде досягнуто прийнятний рівень соціального ризику.

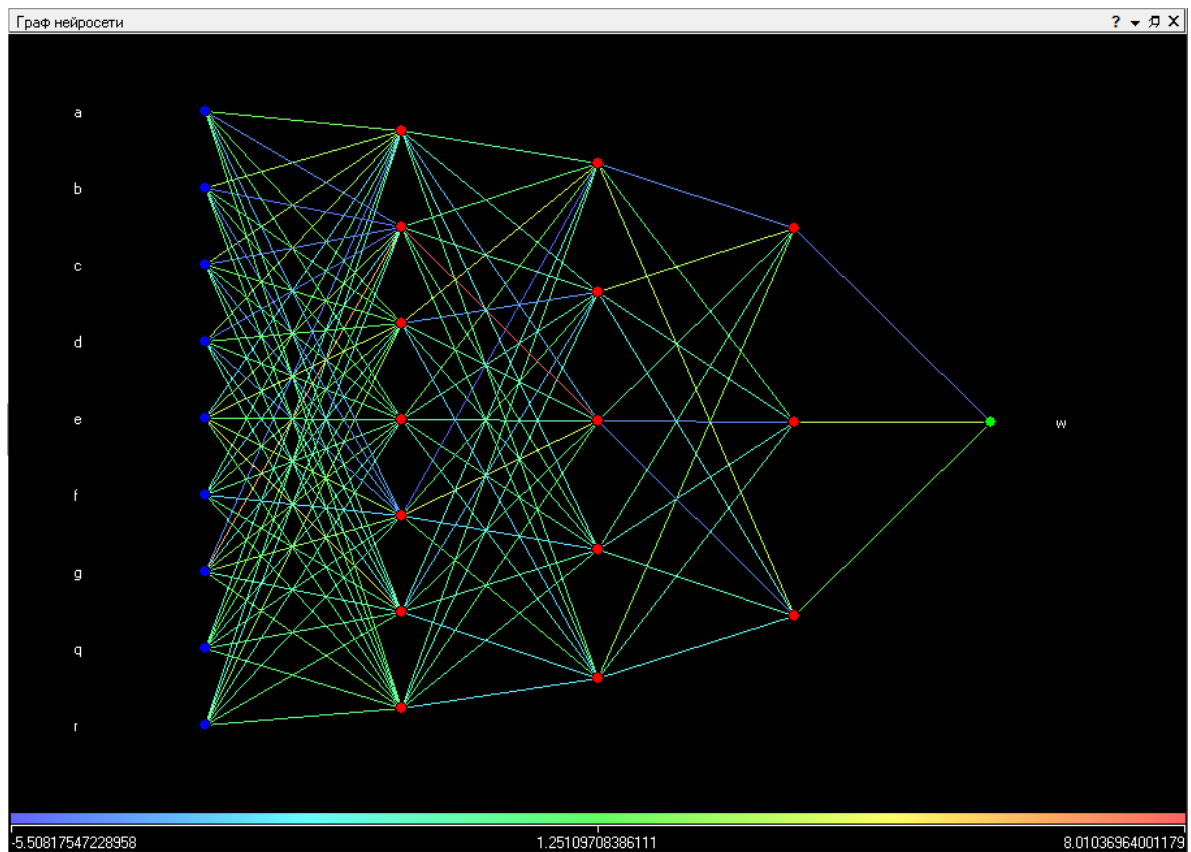


Рис. 3.1 Структура нейронної мережі

У результаті навчання нейронної мережі було отримано результуючі значення відстані, на якій досягається прийнятний рівень соціального ризику. Ці значення були порівняні зі значеннями, отриманими за допомогою розробленої інформаційної системи (представлена в 4 розділі) із встановленням відносного відхилення розрахунків. При цьому усереднене відхилення по 10000 експериментах склало 1,35 %. Це дозволяє зробити висновок про те, що нейронна мережа навчена за даною технологією дає результат близький до результату роботи інформаційної системи на основі представленого методу (таблиця 3.3).

Наведена вище структура нейронної мережі була обрана емпіричним шляхом у результаті порівняння з результатами інших типів структур нейронних мереж, графи яких наведені на рисунку 3.2.

Обрана для навчання структура нейронної мережі дозволила отримати найменшу відносну похибку розрахунків, в той час як похибки при інших наведених структурах перевищували значення 1,5%.

## Порівняння результатів роботи нейронної мережі з вихідними даними

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V	18.7	8.5	17	27.2	10.2	20.4	13.6	15.3	22.1	25.5
Fp	317.9	144.5	289	462.4	173.4	346.8	231.2	260.1	375.7	435.5
m1	220.877	100.399	200.798	321.276	120.479	240.957	160.638	180.718	261.037	301.196
E	9.16E+11	4.16E+11	8.33E+11	1.33E+12	5E+11	9.99E+11	6.66E+11	7.49E+11	1.08E+12	1.249E+12
$\Delta P(100)$	75.829	65.602	74.702	79.725	68.096	76.816	71.912	73.408	77.648	79.127
I(100)	3.898	2.374	3.672	4.931	2.663	4.117	3.191	3.436	4.329	4.736
Pror1(100)	0.005241	0.000198	0.003654	0.019	0.000447	0.007219	0.001509	0.002423	0.009616	0.016
Pror2(100)	0.851	0.79	0.845	0.869	0.807	0.856	0.83	0.839	0.86	0.867
Pror3(100)	1.32E-11	3.45E-15	4.9E-12	6.75E-10	2.37E-14	3.29E-11	4.79E-13	1.63E-12	7.61E-11	3.421E-10
Pror4(100)	0.162	0.047	0.142	0.26	0.064	0.182	0.102	0.122	0.202	0.241
Pror5(100)	3.62E-06	6.29E-12	9.36E-07	0.000371	2.04E-10	1.17E-05	3E-08	1.93E-07	3.27E-05	0.0001811
D	108.008	83.461	104.694	122.087	88.589	111.126	97.327	101.149	114.073	119.537
ts	14.949	11.772	14.523	16.746	12.441	15.348	13.574	14.067	15.725	16.422
Pr(100)	1	0.985	1	1	0.994	1	0.999	0.999	1	1
Pport1(100)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pport2(100)	0.998	0.717	0.996	1	0.877	0.999	0.979	0.991	1	1
Pport3(100)	0.86	0.175	0.804	0.973	0.33	0.9	0.621	0.726	0.929	0.963
S	1070	820	1030	1210	870	1100	960	1000	1130	1180
Дані нейромережі	1055.96	863.68	1023.95	1188.44	873.92	1083.96	947.82	987.15	1109.56	1173.83
Похибка, %	1.31	5.33	0.59	1.78	0.45	1.46	1.27	1.29	1.81	0.52

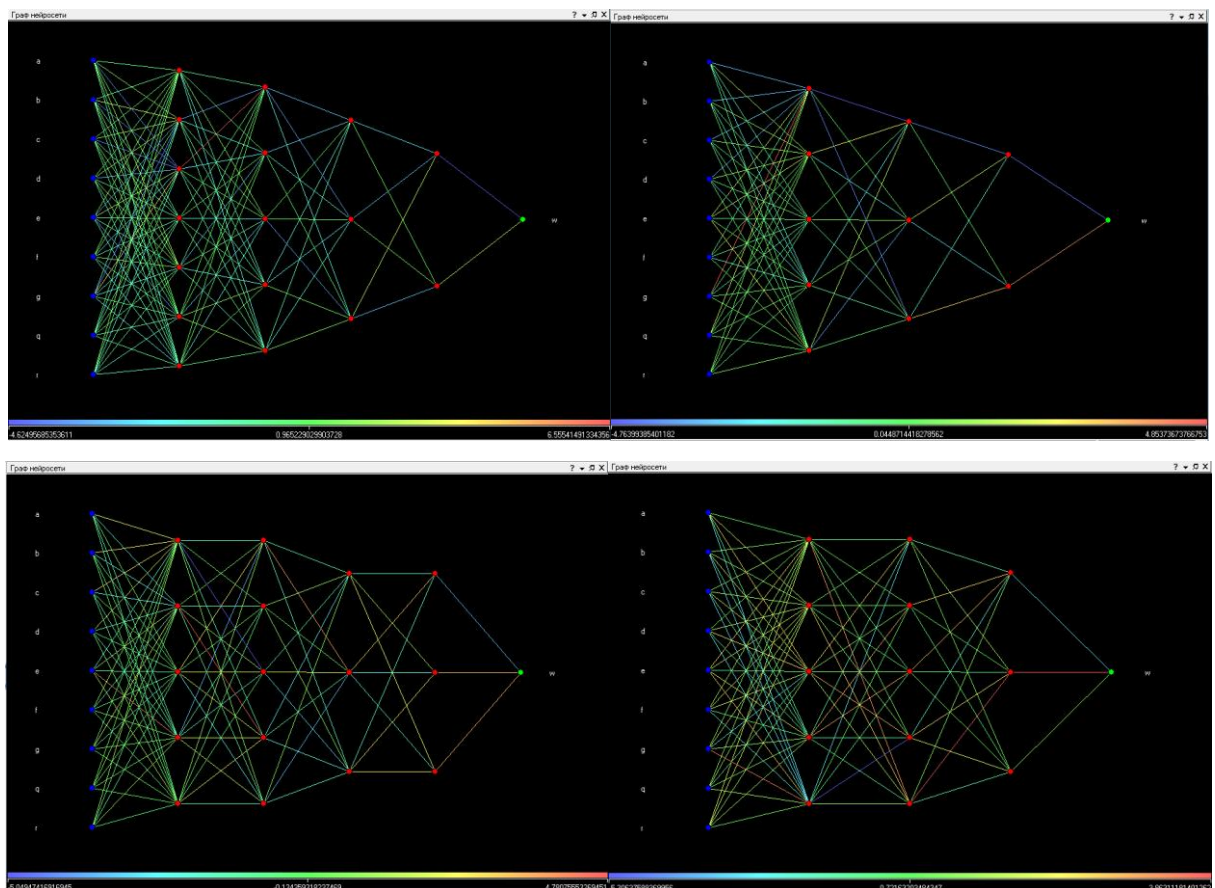


Рис. 3.2 Розглянуті структури нейронних мереж

Отже, побудовану нейронну мережу можна використовувати для розв'язання подібних задач, оскільки вона адекватно відображає результат, а також дає можливість оцінювати соціальний ризик для ситуації, що динамічно змінюється. Також застосування нейронної мережі дозволило виявити вхідні параметри, що слабо впливають на результат.

### **3.2 Метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій на АГЗС**

Процес ухвалення рішення при управлінні складними об'єктами і системами нерозривно пов'язаний з рішенням завдання розпізнавання ситуацій. Але висока складність завдань розпізнавання не дозволяє вважати повністю вирішеними питання їхньої формалізації.

Основною метою розпізнавання є побудова ефективних обчислювальних моделей і методів для віднесення формалізованих описів ситуацій до відповідних класів.

За умови встановлення відповідності між класами, заданими на множині рішень і множині розпізнаних ситуацій, автоматизація процедур розпізнавання стає елементом автоматизації процесу прийняття рішень.

Розпізнавання ризиків виникнення ТА необхідно проводити відповідно до єдиного методу, що включає сукупність моделей, які відображають представлення складної ситуації, процеси її контролю та надання оперативної інформації.

Пропонований метод базується на відомих методах теорії розпізнавання і теорії інтелектуальних систем і дозволяє оперативно виявляти ступінь небезпеки складних ситуацій. Метод включає наступні основні етапи:

- вибір загальних принципів і вихідних моделей для розробки методу;
- формалізація ризиків різного виду;
- розробка моделі подання знань і правила логічного виводу з

розпізнавання ситуацій;

– моделювання і оцінка якості рішення завдання розпізнавання ризиків виникнення ТА.

В основу методу подання знань про ризик виникнення ТА покладені наступні основні принципи:

– рішення завдань об'єднання інформації, що надходить від різних джерел – даний принцип припускає об'єднання різних видів інформації з різними видами невизначеності;

– виявлення ситуацій шляхом порівняння (ідентифікації) даних від різних джерел інформації;

– визначення ступеня небезпеки ситуацій – даний принцип припускає використання експертної інформації.

Найбільш відповідальним етапом розпізнавання ризиків є виробка вирішальних правил, які повинні бути представлені у вигляді, що забезпечує їхню програмну реалізацію в конкретному комплексі засобів автоматизації в реальному масштабі часу.

Існуючі методи розпізнавання ситуацій не дозволяють повною мірою описати процес вирішення задачі оцінки ризиків виникнення ТА. Зазначене свідчить на користь актуальності розробки методу подання знань про ризик виникнення техногенних аварій на АГЗС.

Розглянемо математичну постановку завдання розпізнавання.

Нехай задана множина  $M$  можливих ризиків  $s$ . При цьому на множині існує розбивка на кінцеве число підмножин (класів)  $\Omega_i, i = \overline{1, m}$ ;  $M = \bigcup_{i=1}^m \Omega_i$ .

Задана лише деяка інформація про класи  $\Omega_i$ . Ризики  $s$  задаються значеннями деяких ознак  $x_j, j = \overline{1, N}$ . Сукупність значень ознак визначає опис ризику  $s$ .

Кожна з ознак може приймати значення з різних множин припустимих значень, наприклад:  $\{0, 1, \Delta\}$ , 0 – ознака не виконана, 1 – ознака виконана,  $\Delta$  – інформація про ознаку відсутня;  $\{a_1, \dots, a_d\}$  – ознака має кінцеве число значень  $d$ .

Завдання розпізнавання полягає в тому, щоб для даного ризику  $s$  і набору класів  $\Omega_1, \dots, \Omega_m$  за інформацією  $I_0(\Omega_1, \dots, \Omega_m)$  про класи і опис ризику  $I_0(s)$  визначити значення предиката  $P(s \in \Omega_m)$ .

Відповідно до керівних документів можна виділити дві основні ситуації, що виникають – «штатну» і «надзвичайну».

«Штатною» ситуацією передбачаються незначні події, які можуть бути ліквідовані наявними силами відповідних чергових підрозділів заданих територіальними обмеженнями ( $Z_k$ ), із заданими обсягами збитків ( $\Delta V_s$ ), заданою тривалістю ( $\Delta H_s$ ), з певним розвитком і плином ( $\Delta \Psi_s$ ), у заданому інтервалі часу ( $\Delta t_s$ ), відповідно до відпрацьованих ситуацій ( $K_j$ ).

Під НС техногенного характеру розуміють порушення нормальних умов життя і діяльності людей на окремій території чи об'єкті, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом або іншою небезпечною подією, яка призвела (може призвести) до неможливості проживання населення на території чи об'єкті, ведення там господарської діяльності, загибелі людей та/або значних матеріальних втрат.

Класифікація НС техногенного та природного характеру за їх рівнями здійснюється для забезпечення організації взаємодії центральних і місцевих органів виконавчої влади, підприємств, установ та організацій у процесі вирішення питань, пов'язаних з надзвичайними ситуаціями та ліквідацією їх наслідків.

Залежно від обсягів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, надзвичайна ситуація класифікується за рівнями: державного, регіонального, місцевого або об'єктового рівня.

Основною метою розпізнавання ризиків виникнення ТА є побудова ефективних обчислювальних засобів для віднесення формалізованих описів ситуацій до відповідних класів. В основі такого віднесення лежить одержання деякої оцінки ситуацій з її опису [139].



В якості джерел даних про складну обстановку обрані джерела оперативного контролю та поточна інформація. Повідомлення від даних джерел будемо вважати початковими даними для рішення завдання розпізнавання ризиків виникнення техногенних аварій. Джерела інформації включають у свій склад координатні ознаки і часові дані. Вони формуються за результатами обробки отриманої інформації та мають мінімальну затримку за часом. Тому повідомлення джерел інформації варто вважати поточними даними, і відомості про  $j$ -і ситуації можна представити співвідношенням:

$$I_j^m = \{\bar{A}_j, \bar{\Pi}_j, t_j\}, \quad (3.1)$$

де  $\bar{A}_j, \bar{\Pi}_j$  – вектори координат і ознак  $j$ -ї ситуації, що містять наступні дані:

$$\bar{A}_j = \{X_j, Y_j, H_j, V_j, \psi_j\}, \quad (3.2)$$

де  $X_j, Y_j$  – координати ризику виникнення  $j$ -ї ситуації;  $H_j$  – тривалість  $j$ -ї ситуації, що прогнозується;  $V_j$  – обсяги отриманих збитків, що прогножуються,  $\psi_j$  – траєкторія розвитку ситуації.

$$\bar{\Pi}_j = \{Pr\Gamma\Pi_j, K_j\}, \quad (3.3)$$

де  $Pr\Gamma\Pi_j$  – ознака територіальної приналежності;

$K_j$  – інформаційна ознака (кількість жертв, збиток, руйнування, тощо);

$t_j$  – час одержання інформації про  $j$ -у ситуацію.

У якості даних можна використати інформацію, що надходить від приватних осіб, організацій і пунктів управління.

У загальному вигляді початкові дані можна представити:

$$I_k^p = \{N_{zk}, \bar{A}_k^p, \bar{\Pi}_k^p, t_k^p\}, \quad (3.4)$$

де  $k$  – ризики, що прогножуються,  $N_{zk}$  – можливість приналежності до однієї зі штатних ситуацій (типової ситуації),  $\bar{A}_k^p, \bar{\Pi}_k^p$  – вектори координатних і інформаційних даних  $k$ -го ризику, що містять наступні дані:

$$\bar{A}_k^p = \{X_k^p, Y_k^p, H_k^p, V_k^p, \Psi_k^p\} \quad (3.5)$$

$$\bar{\Pi}_k^p = \{K_k^p, O_{K_k^p}\}, \quad (3.6)$$

де  $O_{K_k^p}$  – оцінка (якісної або кількісної) ознаки  $K_k^p$   $k$ -го ризику.

Дуже часто для правильної класифікації ризику варто вивчати не тільки особливості, що характеризують їх, але й такі особливості, які характеризують взаємозалежні процеси.

Звичайно, ситуації аналізуються в динаміці, що змінює їхній опис. Кожен стан ситуації визначається набором ознак. У такому випадку завдання розпізнавання ризику можна визначити як класифікацію сукупностей станів або як класифікацію траєкторій зміни ситуації. Для розпізнавання ризику іноді буває досить використати сукупність тих станів, які приймала ситуація щодо спостерігача в процесі спостереження.

Але найчастіше цих відомостей виявляється недостатньо і доводиться враховувати не тільки сукупність спостережуваних станів, але й їх послідовність.

У цьому випадку на результат розпізнавання ризику в більшій мірі впливає передісторія і можливий наступний розвиток ситуації.

У зв'язку з цим для одержання опису ризиків виникнення техногенних аварій розділимо зону відповідальності на окремі ділянки:

- ділянка простору, що вимагає особливої уваги ( $Z_k$ );
- зона і об'єкти регіонального значення ( $Z_m$ );
- зона відповідальності і об'єкти державного значення ( $Z_n$ );
- ділянка простору за межами територіальної межі відповідальності пункту управління, але інформація про яку надходить на пункт управління ( $Z_p$ )

Якщо межу відповідальності представити у вигляді ( $Z_o$ ), то співвідношення, що описує її складові ділянки, може бути представлено наступним виразом:

$$\{Z_p, Z_m, Z_n, Z_k\} \subset Z_o \quad (3.7)$$

Формалізація відносин між початковими даними, що надходять від джерел інформації, і апріорними даними була проведена з використанням основних положень і вимог керівних документів. Згідно із цими документами складені часткові логіко-лінгвістичні описи деяких ризиків виникнення ТА. Вони мають такий вигляд:

Опис 1. Якщо інформація, що надійшла, про ризик виникнення ТА не підтверджується ознаками, що характеризують надзвичайну ситуацію, то дана ситуація характеризується як штатна ( $s_0$ ).

Опис 2. Якщо отримані інформаційні ознаки про ситуацію явно вказують на настання ризику виникнення ТА, то дана ситуація характеризується як надзвичайна ( $s_1$ ).

Опис 2.1. Якщо надходить інформація про пожежі в районах віддалених від небезпечних (важливих) об'єктів і поточні координати належать зоні  $Z_p$ , а екстрапольовані координати можливого поширення належать зоні  $Z_m$ , то дана ситуація може характеризуватися як та, що може перерости в техногенну аварію. Екстраполяція виробляється шляхом обробки додаткової інформації про умови зовнішнього середовища.

Опис 2.2. Якщо ознаки природних катаклізмів виявлені в зоні  $Z_n$  та інтенсивність їх прояву досить висока та можливе завдання збитків і загибель людей, то така ситуація може перерости в НС.

Опис 2.3. Якщо інформація, що надійшла, про пожежі (повені, тощо) дозволяє зробити висновок про можливість завдання збитків об'єктам економіки та життєдіяльності зони  $Z_k$ , то така ситуація може характеризуватися як НС.

Опис 2.4. Якщо інформація, що надійшла, не несе ознак НС, але має місце прояв декількох факторів природних явищ (повінь, сель, пожежа, руйнування транспортних комунікацій), то така ситуація може характеризуватися як НС.

Опис 2.5. Якщо після реагування на сформовану ситуацію не вдається впоратися з нею і дані про ситуацію показують зміни з наростаючим збитком, то така ситуація може характеризуватися як загрозна або НС.

Аналіз проведених описів дозволяє виявити взаємозв'язок між різнорідними початковими даними, об'єднання яких дає можливість виявити штатні і НС.

З опису 1 можна виявити наступні відношення:

а) відношення приналежності ( $R_1$ ):

– отримано дані про координати ризику виникнення техногенних аварій в зоні відповідальності ( $X_j^n, Y_j^n$ ) і вони належать зоні відповідальності ( $Z_p$ ), представлене співвідношенням:

$$(X_j^n, Y_j^n) R_1 Z_p \quad (3.8)$$

– тривалість події ( $X_j^n$ ) не перевищує заданого значення ( $\Delta H_3$ ), представлене співвідношенням:

$$H_j^n R_1 \Delta H_3 \quad (3.9)$$

– обсяги отриманих збитків (втрат) ( $V_j^n$ ) не перевищують граничних для даної події ( $\Delta V_3$ ), представлене співвідношенням:

$$V_j^n R_1 \Delta V_3 \quad (3.10)$$

– умови зовнішнього середовища дозволяють стверджувати про локальність техногенної аварії, що відбувається ( $\Psi_j^n$ ) (траєкторії розвитку ситуації) або ж незначної його зміни ( $\Delta \Psi_3$ ), представлене співвідношенням:

$$\Psi_j^n R_1 \Delta \Psi_3 \quad (3.11)$$

– відповідність часу протікання ( $t_j^n$ ) техногенної аварії заданому інтервалу часу ( $\Delta t_3$ ), представлене співвідношенням:

$$t_j^n R_1 \Delta t_3 \quad (3.12)$$

б) відношення подібності ( $R_2$ ):

– поточна ситуація ( $N_{3j}$ ) за значеннями інформаційних ознак відповідає штатній ситуації ( $N_{3пл}$ ), представлене співвідношенням:

$$N_{3j} R_2 N_{3пл} \quad (3.13)$$

– значення інформаційних ознак ( $K_j$ ) перебувають у заданих межах для даної ситуації ( $K_s$ ), представлене співвідношенням:

$$K_j R_2 K_s \quad (3.14)$$

в) відношення присутності (відсутності) ( $R_3$ ):

– відсутність ознак надзвичайних ситуацій, обумовлена співвідношенням:

$$I_n. HC R_3 0 \quad (3.15)$$

Якщо не виконується хоча б одне відношення опису 1, то така ситуація характеризується описом 2.

З опису 2.1 можна виявити наступні відношення:

а) відношення приналежності:

– отримані дані про координати події в зоні відповідальності ( $X_j^n, Y_j^n$ ) і вони належать зоні відповідальності ( $Z_m$ ), представлене співвідношенням:

$$(X_j^n, Y_j^n) R_1 Z_m \quad (3.16)$$

– можливий розвиток ситуації і зміни її в просторі ( $X_j^{n+m}, Y_j^{n+m}$ ) у глибину зони  $Z_p$ , представлене співвідношенням:

$$(X_j^{n+m}, Y_j^{n+m}) R_1 Z_p \quad (3.17)$$

б) відношення подібності:

– наявність ознак надзвичайної події, обумовлена співвідношенням:

$$HP_j R_2 1 \quad (3.18)$$

З опису 2.2 можна виявити наступні відношення:

а) відношення приналежності:

– попередні дані про надзвичайний стан ( $X_j, Y_j$ ) відносилися до зони  $Z_n$ , представлене співвідношенням:

$$(X_j^{n-1}, Y_j^{n-1}) R_1 Z_n \quad (3.19)$$

в) відношення присутності:

– відсутність ознак надзвичайних ситуацій, обумовлена співвідношенням (3.15);

– інформаційні ознаки  $K_j$  змінюються в часі  $s$  наближаються до критичних значень.

З опису 2.3 можна виявити наступні відношення:

а) відношення приналежності:

– отримані дані про координати події в зоні відповідальності  $(X_j^n, Y_j^n)$  і вони належать зоні відповідальності  $Z_m$ , представлене співвідношенням (3.16);

– можливе знищення об'єктів економічної або життєзабезпечуючої структури  $(X_j^{n+m}, Y_j^{n+m})$  або подія біля таких об'єктів  $Z_k$ , представлена співвідношенням:

$$(X_j^{n+m}, Y_j^{n+m}) R_1 Z_k \quad (3.20)$$

б) відношення подібності:

– наявність ознак надзвичайної події, обумовлена співвідношенням:

$$HP_j R_2 0 \quad (3.21)$$

Виходячи з отриманих формалізованих описів відношень і наведених вище ризиків виникнення і розвитку техногенних аварій, можна одержати вирази, що визначають ситуації, які склалися в зоні відповідальності.

Для штатної ( $s_0$ ) і надзвичайної ( $s_1$ ) ситуацій вони можуть бути представлені в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & (\{X_l^n; Y_j^n\} \in Z_k) \wedge (H_j^n \in \Delta H_s) \wedge (V_j^n \in \Delta V_s) \wedge (\Psi_j^n \in \Delta \Psi_s) \wedge \\ & (t_j^n \in \Delta t_s) \wedge (N_{zj} = \Delta N_{znl}) \wedge (K_j = K_s) \wedge (Pr HC_j = 0) \Rightarrow s_0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} & (\{X_l^n; Y_j^n\} \notin Z_k) \wedge (H_j^n \notin \Delta H_s) \wedge (V_j^n \notin \Delta V_s) \wedge (\Psi_j^n \notin \Delta \Psi_s) \wedge \\ & (t_j^n \notin \Delta t_s) \wedge (N_{zj} \neq \Delta N_{znl}) \wedge (K_j \neq K_s) \wedge (Pr HC_j = 1) \Rightarrow s_1 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Аналіз наведених відношень дозволяє об'єднати їх у групи залежно від відомостей, використовуваних для їхнього формалізованого опису.

До першої групи варто віднести просторові, часові і ресурсні відношення:

$$\begin{aligned}
(\{X_l^n; Y_j^n\})R_1Z_k &= (\{X_l^n; Y_j^n\} \in Z_k); \\
(\{X_l^n; Y_j^n\})R_1Z_p &= (\{X_l^n; Y_j^n\} \in Z_p); \\
(\{X_l^{n+1}; Y_j^{n+1}\})R_1Z_m &= (\{X_l^{n+1}; Y_j^{n+1}\} \in Z_m); \\
(\{X_l^n; Y_j^n\})R_1Z_m &= (\{X_l^n; Y_j^n\} \in Z_m); \\
(\{X_l^{n-1}; Y_j^{n-1}\})R_1Z_n &= (\{X_l^{n-1}; Y_j^{n-1}\} \in Z_n); \\
(\{X_l^{n+m}; Y_j^{n+m}\})R_1Z_n &= (\{X_l^{n+m}; Y_j^{n+m}\} \in Z_n); \\
(H_j^n R_1 \Delta H_3) &= (H_j^n \in \Delta H_3); \\
(V_j^n R_1 \Delta V_3) &= (v_j^n \in \Delta V_3); \\
(\Psi_j^n R_1 \Delta \Psi_3) &= (\Psi_j^n \in \Delta \Psi_3); \\
(t_j^n R_1 \Delta t_3) &= (t_j^n \in \Delta t_3).
\end{aligned} \tag{3.24}$$

До другої групи віднесемо відношення, для формалізованого опису яких потрібен ступінь подібності між поточними і апріорними даними. До них відносяться ознакові відношення:

$$\begin{aligned}
(N_{3j} R_2 N_{3пл}) &= (N_{3j} N_{3пл}); \\
(K_j R_2 K_3) &= (K_j K_3); \\
(НП_j R_2 НП_3) &= (НП_j) = 1.
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Значна частина даних, використовуваних при рішенні поставленого завдання, недоступна у формі точних, чітко визначених чисел.

Через недосконалість вимірювальних пристроїв і мовного способу одержання інформації або внаслідок того, що в багатьох випадках людина (експерт) являє собою єдине джерело необхідних відомостей, використовувані дані містять елементи невизначеності.

Наявність методів подання і аналізу невизначеності (у тому числі суб'єктивної) є необхідною умовою рішення завдання розпізнавання ризиків виникнення техногенних аварій.

Тому для обробки таких знань можуть використовуватися логічні обчислення з багатозначною логікою або теорія нечітких множин.

### **3.3 Метод вироблення рішень при аварійних ситуаціях техногенного характеру у системах управління реального часу для АГЗС**

Як відомо, основу автоматизації управління становить моделювання процесів аналізу поточної ситуації, виробки рішення і трансформація цих моделей у програмне забезпечення систем управління.

Проведений аналіз показує, що моделювання дій з управління черговими силами відповідних підрозділів для протидії ТА на кількісній основі або неможливо (важке), або при побудові таких моделей у них припускаються сильні спрощення і припущення.

Це обумовлено тим, що об'єкти моделювання не задовольняють основним принципам, на яких базується застосовність класичних обчислювальних методів у силу наявності наступних характерних властивостей:

- конфліктний та ієрархічний характер взаємодії як між елементами усередині об'єкта, так і з навколишніми об'єктами, при сильному впливі на процеси функціонування людського фактору;

- переважно понятійний характер наявних описів умов і поточної ситуації в зовнішньому середовищі, у рамках якої передбачається використання об'єкта;

- присутність досить великої невизначеності в описі параметрів зовнішнього середовища та об'єкта управління.

Під управлінням розуміється здійснюваний на підставі одержуваної інформації про стан об'єктів управління і зовнішнього середовища цілеспрямований вплив на керовані об'єкти, що забезпечує досягнення необхідних цільових настанов.

Керуючий орган автомобільної газозаправної станції, що здійснює виробку рішень, виконує збір і об'єднання інформації про поточний стан об'єкта управління і зовнішнього середовища та на основі зібраних даних формує узагальнене представлення про обстановку і прогнозування її розвитку (рис. 3.3).





Рис. 3.3 Функції керуючих органів у процесі виробки рішень при управлінні АГЗС

Далі виконується зіставлення прогнозованого стану обстановки з цільовою настановою системи та виявляються ситуації, що вимагають втручання, і завдання управління, що підлягають рішенню. На основі обрання планів і засобів рішення окремих часткових завдань, які узгоджуються між собою, здійснюється прийняття рішень, формування і видача команд на керований об'єкт. Також керуючий орган здійснює контроль реалізації прийнятих рішень та корегування планів відповідно до ходу реального процесу.

Проведений в [93] докладний аналіз процесу виробки рішень показує, що останній характеризується строгою логічною послідовністю та етапом узагальнення елементів обстановки до рівня, характерного для особи, що приймає рішення.

Таким чином, розроблювальний формальний апарат виробки рішень повинен дозволяти моделювати елементи розумової діяльності особи, що приймає рішення.

Другою важливою вимогою до спеціального математичного забезпечення є адаптація реалізованих принципів виробки рішень до умов функціонування системи управління, зокрема, до поточної обстановки. Під адаптацією спеціального математичного забезпечення тут розуміється двоїстий процес, з

одного боку, уточнення знань та даних про зовнішнє середовище і керовані об'єкти шляхом коректування відповідних моделей, з іншого боку, зміни системи правил виробки рішення на управління підлеглими об'єктами, а при необхідності – і правил обробки інформації стосовно конкретної обстановки.

Одним із кроків у створенні спеціального математичного забезпечення, що задовольняє цим вимогам, може бути використання систем, здатних оцінювати поточну ситуацію і ухвалювати рішення щодо управління. Особливістю таких систем є те, що вони будуються на базі понять, що характеризують об'єкти системи і зовнішнього середовища.

В умовах апріорної невизначеності функціонування системи управління такими узагальненими поняттями можуть бути цілі системи. Такі системи називаються семіотичними або логіко-лінгвістичними [140]. Під семіотичною системою будемо розуміти кортеж:

$$W = (T, H, G, Q, X, L, E), \quad (3.26)$$

у якому підсистема  $A = (T, H, G, Q)$  є формальною системою, а підсистема  $B = (X, L, E)$  призначена для зміни зазначеної формальної системи в режимах навчання і адаптації стосовно АГЗС. Підсистема  $A$  виражає синтаксичний аспект системи  $W$ , а підсистема  $B$  – її семантичний і прагматичний аспекти.

У підсистемі  $A$  множина  $T$  є множина базисних символів;  $H$  – множина синтаксичних правильних виразів;  $G$  – підмножина безлічі синтаксично правильних виразів, обумовлених як семантично правильні вирази;  $Q$  – правила, що дозволяють одержувати з елементів  $G$  нові семантично правильні вирази.

Підсистема  $B$  відбиває основну специфіку семіотичних систем. Правила  $X$  змінюють множину  $G$  шляхом модифікації, введення або видалення законів ПрО. Правила  $L$  визначають зміну правил  $Q$ . В теорії цілеспрямованих систем [141, 142] проблема зміни правил  $Q$  звичайно трактується як завдання адаптації до даної предметної області. Правила  $E$  змінюють правила  $H$ , тобто синтаксис системи  $W$ .

Існують два основних підходи до побудови семіотичних систем: ситуаційний і аксіоматичний.

Ситуаційний підхід застосовується, в основному, до систем, для яких характерна велика кількість ситуацій і порівняно невелике число схем рішень.

Позитивною властивістю ситуаційного підходу є широке використання апарата узагальнення, що дозволяє представляти моделі складних проблемних середовищ у компактному вигляді без втрати істотної для рішення завдання інформації [141, 143].

Основними недоліками, що знижують ефективність використання ситуаційного підходу для формалізації завдань прийняття рішень, є:

- використання в ситуаційному підході мов представлення знань, що породжують громіздкі і малоефективні для користувача конструкції;

- внесення в систему знань нових понять і відношень може привести до необхідності перебудови всієї структури моделі проблемного середовища на всіх рівнях узагальнення (порушення умови адаптивності);

- в умовах апіорної невизначеності і великої розмаїтості варіантів розвитку подій різко знижується обґрунтованість рішень;

- неможливість обґрунтування рішення, запропонованого для реалізації, якщо відповідь у готовому вигляді не зберігається в системі знань, тобто відсутність можливості організації роботи системи в питально-відповідальному режимі.

Від перерахованих недоліків вільний аксіоматичний підхід, що базується на формально-логічному описі проблемного середовища і використовує процедури дедуктивного виводу. Його головна перевага полягає в тому, що немає необхідності знати, яке рішення необхідно прийняти в тій або іншій ситуації. Воно логічно виводиться із загальних принципів, положень, правил, що описують властивості проблемної області і опис сформованої ситуації.

Однак даний підхід припускає інформаційну повноту, несуперечність і конкретність моделі знань, що суперечить особливостям знань про завдання,

розв'язувані при управлінні АГЗС в умовах суперечливості і обмеженості вихідних даних.

Вихід з цього положення полягає у розвитку аксіоматичного підходу на основах розробки способів подання знань в ІС АГЗС, що враховує неповноту і можливу суперечливість інформації.

Основним напрямком досліджень, що задовольняють зазначеним вимогам, є використання аксіоматичного підходу до формалізації і рішення завдань виробки рішень для управління ризиками виникнення ТА, що мають розрахунковий і логіко-аналітичний характер, і дозволяють проводити формалізацію тільки на базі кількісних математичних методів. Використання аксіоматичного підходу лежить у рамках розробки інтелектуальної системи, заснованої на знаннях експертів у розглянутій предметній області і теорії нечітких множин.

Передача керуючій електронно-обчислювальній машині функцій, що забезпечують рішення складних логічних завдань у процесі виробки рішень, припускає дослідження ряду питань, основним з яких є розробка методу синтезу варіанта рішення в ході динамічного коректування планів, що дозволяє синтезувати адаптивні алгоритми управління обстановки, що склалася моделюванням розумової діяльності людини і здійснювати структурування знань системи управління.

На основі методу виробки рішень можливо зробити наступні висновки:

– автоматизація процесів виробки рішень в разі техногенної аварії при керуванні автомобільною газозаправною станцією повинна ґрунтуватися на семіотичному принципі;

– аксіоматичний підхід є найбільш прийнятний для рішення завдання виробки рішень при техногенних аваріях;

– розробка методу синтезу варіантів рішень дозволяє використати адаптивні алгоритми управління з моделюванням розумової діяльності людини.

### 3.4 Аналітичні оцінки наслідків аварій на АГЗС

Незалежно від джерела виникнення всі техногенні аварії мають практично ті самі фактори негативного впливу на людину і середовище її існування – це вплив ударної хвилі при вибуху газоповітряних (паливно-повітряних) сумішей; термічний вплив при пожежах; токсичний вплив викидів небезпечних хімічних речовин, шлейфа пожежі і т.п.; механічний вплив при ураженні уламками, при обваленні будинків і споруд і т.п. Для визначення вражаючої дії негативних факторів використовують детермінований підхід, який встановлює деякі фіксовані значення негативних факторів, що відповідають тому чи іншому ступеню ураження людини, будинків і споруд.

Аналітичні моделі, що описують вплив негативних факторів на людину мають назву моделі «доза – ефект». Модель «доза – ефект» застосовується при визначенні ймовірностей ураження людини за двох умов:

- 1) коли рівень дози значний, але її вплив короткочасний, що звичайно відбувається при аварійних подіях, таких, як пожежа, вибух і т.п;
- 2) коли організм поглинає забруднювач постійно, але невеликими порціями. Цей забруднювач поступово накопичується в організмі, що після закінчення часу приводить до негативних наслідків для здоров'я людини.

Таким чином, одна й та сама міра впливу може викликати наслідки різної ваги в різних людей, тобто ефект ураження носить ймовірнісний характер. Розрахунок умовних ймовірностей ураження визначеного ступеня ваги в моделях «доза – ефект» виражається функцією Гаусса (функцією помилок), що записується як:

$$P_{nop} = f(P_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_r-5} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \dots\dots\dots(3.27)$$

Верхньою межею інтеграла є так звана пробіт-функція  $P_r$ , що відображає зв'язок між імовірністю ураження  $P_{ураж}$  і дозою негативного впливу  $D$ :

$$Pr = a + b \cdot \ln D, \quad (3.28)$$

де  $a$  і  $b$  – константи для кожної речовини чи процесу, що характеризують специфіку і міру небезпеки його впливу, обумовлені експериментально;  $D$  – поглинена людиною доза впливу.

Для різних вражаючих факторів існують свої особливості розрахунку величини дози. Зокрема, при визначенні імовірності смертельного ураження людини при термічному впливі в якості дози використовується добуток інтенсивності випромінювання на тривалість прямокутного теплового імпульсу (індекс дози). Термічний вплив на людину пов'язаний з перегрівом і наступними біохімічними змінами верхніх шарів шкіри. Час досягнення «порогу болю»  $\tau$ , с, пов'язаний з щільністю теплового потоку  $q$ , кВт/м<sup>2</sup>, співвідношенням:

$$\tau = \left( \frac{35}{q} \right)^{1,33}.$$

Ступінь термічного впливу залежить від величини теплового потоку і тривалості теплового випромінювання.

Імовірність ураження того чи іншого ступеня при термічному впливі визначається за вищенаведеною формулою з використанням пробіт-функцій:

$$\text{Опік 1 ступеня: } Pr = -34.8 + 3.02 \cdot \ln \left( q^{\frac{4}{3}} \cdot \tau \right)$$

$$\text{Опік 2 ступеня: } Pr = -38.1 + 3.02 \cdot \ln \left( q^{\frac{4}{3}} \cdot \tau \right)$$

$$\text{Смертельне ураження: } Pr = -31.4 + 2.56 \cdot \ln \left( q^{\frac{4}{3}} \cdot \tau \right).$$

Термічний вплив на легкозаймисті матеріали, наприклад унаслідок пожежі, може викликати подальше поширення аварії і перехід її в стадію каскадного розвитку. Особливо небезпечно нагрівання резервуарів з нафтопродуктами, що може привести до вибуху ємності.

Імовірність ушкоджень стін промислових будинків, при яких можливе відновлення будинків без їхнього зносу, може оцінюватися у співвідношенні:

$$P_{r1} = 5 - 0,26 \ln V_1 \quad (3.29)$$

Фактор розраховується з урахуванням перепаду тиску в хвилі й імпульсу статичного тиску за співвідношенням:

$$V_1 = \left( \frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{I} \right)^{9,3}, \quad (3.30)$$

де  $\Delta P$  – надлишковий тиск, Па;

$I$  – імпульс фази стискання, Па·с.

Імовірність руйнування промислових будинків, при яких будинки, що підлягають знесенню, оцінюється за співвідношенням:

$$P_{r2} = 5 - 0,22 \ln V_2 \quad (3.31)$$

У цьому випадку фактор  $V_2$  розраховується за формулою:

$$V_2 = \left( \frac{40000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left( \frac{460}{I} \right)^{11,3} \quad (3.32)$$

Імовірність тривалої втрати керованості в людей, що потрапили в зону дії ударної хвилі при вибуху хмари ППС, може бути оцінена за величиною пробіт-функції:

$$P_{r3} = 5 - 5,74 \ln V_3 \quad (3.33)$$

Фактор небезпеки  $V_3$  розраховується за співвідношенням:

$$V_3 = \frac{4,2}{\bar{p}} + \frac{1,3}{\bar{i}}, \quad (3.34)$$

де безрозмірний тиск  $\bar{p}$  і безрозмірний імпульс  $\bar{i}$  задаються виразами:

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0}; \quad \bar{i} = \frac{I}{P_0^{1/2} m^{1/3}},$$

де  $m$  – маса тіла живого організму, кг.

Залежність імовірності розриву барабанних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі:

$$P_{r4} = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P \quad (3.35)$$

Імовірність відкиду людей хвилею тиску може оцінюватися за величиною пробіт-функції:

$$P_{r5} = 5 - 2,44 \ln V_5 \quad (3.36)$$

Тут фактор  $V_5$  розраховується зі співвідношення:

$$V_5 = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I} \quad (3.37)$$

Зв'язок функції  $P_{ii}$  з імовірністю того чи іншого ступеня ураження знаходиться по таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Зв'язок імовірності ураження з пробіт-функцією

Умовна імовірність ураження, %	Значення величини $P_r$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
-	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Умовну імовірність ураження людини тепловим випромінюванням визначають у такий спосіб: розраховують величину  $P_r$  за формулою:

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln(t \cdot q^{1,33}), \quad (3.38)$$

де  $t$  – ефективний час експозиції, с, який для пожеж проток визначається як:  $t = t_0 + x/u$ ,

де  $t_0$  – характерний час виявлення пожежі, с (допускається приймати 5 с);

$x$  – відстань від місця розташування людини до зони, де інтенсивність теплового випромінювання не перевищує 4 квт/м<sup>2</sup>;

$u$  – швидкість руху людини, м/с (допускається приймати 5 м/с).

Для впливу «вогняної кулі»:  $t_k = 0,92 \cdot \sqrt[3]{m}$ .

Потім за формулою (3.27) чи за допомогою таблиці 3.1 визначають умовну імовірність ураження людини тепловим випромінюванням.



При вибуху резервуара, паро-газоповітряної хмари, вибухової речовини, технологічної установки утвориться ударна хвиля, що характеризується надлишковим тиском  $t_k = 0,92 \cdot \sqrt[3]{m}$  і імпульсом фази стискання  $I^+$ ,  $\kappa\text{Па} \cdot \text{с}$ , яка негативно впливає на людину, будинки, споруди і т.п.

Випадки ураження людини при обваленні будинків, падінні дерев мають ймовірнісний характер і можуть бути оцінені тільки по усередненим статистичним даним. Імовірність уражень того чи іншого ступеня при ударній хвилі на людину можна також визначити за формулою (3.27) з використанням відповідних формул пробіт-функції.

Для визначення масштабів негативного впливу від виникнення аварії на АГЗС використовують оцінки індивідуального, територіального і соціального ризиків [144].

Територіальний ризик у  $k$ -й точці простору для ініціюючої події на виділеному джерелі небезпеки дорівнює:

$$R_{t_{ij}}^k = P_{Bij} \cdot P_{um} \cdot P_{af} \cdot P_{ck} , \quad (3.39)$$

де  $P_{Bij}$  – імовірність виникнення аварії на  $i$ -тому джерелі при реалізації  $j$ -ї ініціюючої події;  $P_{um}$  – умовна імовірність одного з можливих наслідків аварії;  $P_{af}$  – умовна імовірність реалізації одного з можливих видів аварії (пожежі, вибуху, розсіювання шкідливих домішок та ін.);  $P_{ck}$  – умовна імовірність смертельного результату в  $k$ -тій точці простору.

Якщо відома імовірність появи людини в  $k$ -тій точці простору  $P_n^k$ , то визначається індивідуальний ризик загибелі в цій точці людини, що проживає в розглянутому регіоні:

$$R_i^k = R_t^k \cdot P_n^k , \quad (3.40)$$

де  $R_t^k$  – сумарний територіальний ризик у  $k$ -тій точці простору.

Підсумовуючи індивідуальні ризики по всій території розглянутого регіону, визначається індивідуальний ризик проживання в ньому, обумовлений можливими аваріями на АГЗС.

Значення індивідуального ризику  $R$  (1/рік) для аварії на зовнішній технологічній установці визначається за допомогою співвідношення:

$$R = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot Q(A_i), \quad (3.41)$$

де  $n$  – число сценаріїв розвитку аварії;  $Q(A_i)$  – частота реалізації протягом року  $i$ -го сценарію, 1/рік;  $Q_i$  – імовірність ураження людини на визначеній відстані в результаті реалізації  $i$ -го сценарію.

Імовірність ураження людини  $Q_{ij}$  на визначеній відстані (у  $j$ -й зоні) у результаті реалізації  $i$ -го сценарію визначається в такий спосіб:

$$Q_{ij} = 1 - \prod_{k=1}^h (1 - Q_k \cdot Q_{ijk}), \quad (3.42)$$

де  $h$  – число розглянутих вражаючих факторів аварії;  $Q_k$  – імовірність реалізації  $k$ -го вражаючого фактору;  $Q_{ijk}$  – умовна імовірність ураження  $k$ -им вражаючим фактором.

Величина індивідуального ризику характеризує розподіл ризику в просторі, але в деяких випадках потрібно оцінити не тільки частоту появи небезпечних факторів, але і масштаби ймовірних наслідків. Для цього використовується поняття соціального ризику. Наприклад, однакові АГЗС на території і за межею міста будуть мати однаковий розподіл індивідуального ризику, але різні значення соціального ризику.

Соціальний ризик для аварії з пожежами і вибухами  $S$  (1/рік) визначається за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^n Q(A_i), \quad (3.43)$$

де  $n$  – число сценаріїв, для яких виконується умова  $N_i \geq N_0$ ;  $N_i$  – кількість летальних випадків у результаті реалізації  $i$ -го сценарію (події);  $N_0$  – число летальних випадків, для якого оцінюють величину соціального ризику.

Кількість летальних випадків у результаті реалізації  $i$ -го сценарію можна оцінити за наступною формулою:

$$N_i = \sum_{j=1}^m Q_{ij} \cdot n_j, \quad (3.44)$$

де  $m$  – число розглянутих зон ураження;  $n_j$  – середнє число людей, що знаходяться в  $j$ -ой зоні.

Якщо статистичні дані, необхідні для розрахунку частот тих чи інших подій, відсутні, величини цих частот для різних сценаріїв аварії можна оцінити за формулою:

$$Q(A_i) = Q_{AB} \cdot Q(A_i)_{cm}, \quad (3.45)$$

де  $Q_{AB}$  – імовірність виникнення аварії;  $Q(A_i)_{no}$  – статистична імовірність розвитку аварії за  $i$ -ою гілкою дерева подій.

Для розрахунку величини індивідуального ризику необхідно: визначити імовірності виникнення ініціюючих подій для можливих основних сценаріїв аварії; побудувати логічні дерева подій при виникненні основних ініціюючих аварійних ситуацій; визначити статистичні імовірності переходу аварії на різні гілки дерев подій; визначити умовні імовірності ураження при реалізації різних гілок дерева подій.

Імовірності розгерметизації устаткування і імовірності переходу аварії на різні гілки дерева події можна визначити за статистичними даними або у результаті експертної оцінки, умовні імовірності ураження людини – за значеннями пробіт-функції.

### **3.5 Метод кількісної оцінки ризику порушення штатного функціонування інформаційної системи АГЗС**

Прогнозування індивідуального і соціального ризику може бути представлено за допомогою математичної імовірнісної моделі з використанням інформаційної системи. Робочим простором є майданчик техногенного об'єкта – АГЗС (рис. 3.4) прямокутної форми з розмірами: довжина (вісь  $x$ ) і ширина

(вісь  $y$ ). За початок координат прийнятий нижній лівий кут майданчика. Всі параметри мають єдину розмірність ( $m$ ). Джерело небезпеки приймається у вигляді центральної його точки з координатами  $(x, y)$ .

Оцінка ризику аварії на техногенному об'єкті

**Розміри робочого простору, м:**  
 Довжина     Ширина

**Координати джерела небезпеки, м:**  
 $x$       $y$

**Кількість співробітників, чол.**

**Умовні позначення**

- 1 - будівля операторної
- 2 - навіс над паливороздавальними колонками
- 3 - резервуарний парк
- 4 - аварійний резервуар палива
- 5 - майданчик зливу палива
- 6 - резервуар забруднених очищених стоків
- 7 - резервуари протипожежного запасу води
- 8 - майданчик для стоянки автотранспорту
- 9 - флагштоки
- 10 - інформаційна стіна

**Територія техногенного об'єкта**



Рис. 3.4 Робочий простір для оцінки ризику аварії на АГЗС

Імовірність аварії розраховується так само, як для складного об'єкта, в роботі якого –  $C_e$  етапів із задіянням  $C_{sn}$  систем на  $n$ -му етапі. Причому кожній  $m$ -й системі відповідає імовірність її відмови  $P(F_{nm})$ . Кожна система може мати відмови при роботі в різних комбінаціях, як це представлено на рисунку 3.5. Для кожної такої комбінації визначається імовірність виникнення аварії. Так, в роботі АГЗС можна виділити етапи: злив палива з автоцистерни в резервуари, заправка автомобільних балонів, тощо. На етапі зливу палива ( $n=1$ ) задіяна комбінація з чотирьох систем – автоцистерни ( $m=1$ ), резервуарної ємності ( $m=2$ ), трубопроводів ( $m=3$ ) і насосної установки ( $m=4$ ). На етапі заправки автомобільного балону ( $n=2$ ) працює комбінація з п'яти систем – резервуарної ємності ( $m=3$ ), насосної установки ( $m=4$ ), газозаправної колонки ( $m=5$ ) гнучкого заправного рукава ( $m=6$ ) і автомобільного газового балону ( $m=7$ ). Етапи роботи агрегату приймаються незалежними один відносно одного. Якщо прийняти  $C_{gn} = 2^{C_{sn}}$  – кількість комбінацій на  $n$ -му

етапі,  $T_g^m = \frac{\binom{g}{m}}{2^m}$  – стан  $m$ -го біта в двійковому поданні числа  $g$  (0 або 1), а  $g$  приймає всі можливі значення від 0 до  $C_{gm} - 1$ , то імовірність аварії на об'єкті буде:

$$P(E) = \sum_{n=1}^{C_g} \sum_{g=0}^{C_{gm}} P(E_{ng}) \prod_{m=0}^{C_{sn}} \begin{cases} P(E_{nm}), T_g^n = 0 \\ 1 - P(F_{nm}), T_g^n = 1 \end{cases}, \quad (3.46)$$

де  $P(E_{nm})$  – імовірність аварії агрегату при  $g$ -ій комбінації роботи систем на  $n$ -му етапі;  $P(F_{nm})$  – імовірність відмови  $m$ -ї системи на  $n$ -му етапі.

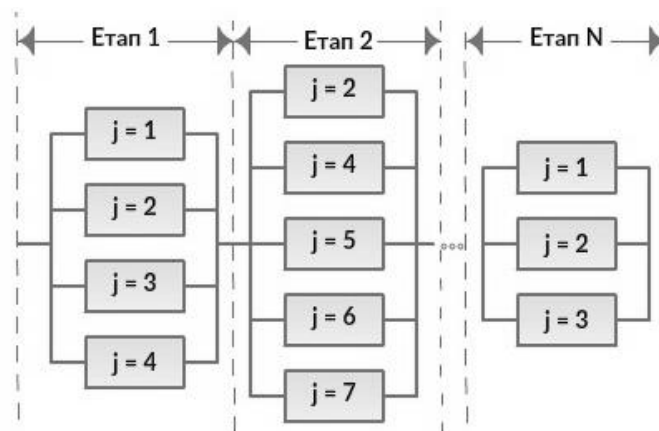


Рис. 3.5 Схема роботи складного агрегату

Небезпечна зона, яка характеризує вплив небезпечних факторів на людину, має центр в точці знаходження агрегату  $(X_E, Y_E)$  і вважається експоненціально-розподіленою з параметром  $\lambda$ . Такий розподіл досить добре описує картину аварійної ситуації, так як саме за таким законом загасає швидкість уламків, що розлітаються, відбувається дифузія токсичної пари і газів, тощо. Формула для визначення імовірності впливу небезпечних чинників:

$$R_E(x, y) = P(E)R(x, y) = P(E)\lambda e^{-\lambda d}, \quad (3.47)$$

де  $d = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2}$ ;  $R(x, y)$  – імовірність впливу вражаючого фактору в точках  $(x, y)$  при аварії.

Персонал об'єкта має чисельність  $C_v$ , у кожного співробітника є робоче місце з координатами  $(X_g, Y_g)$ . Поле розподілу персоналу в робочому

приміщенні біля джерела небезпеки задається нормальним розподілом з параметром  $\delta_g$ , що підтверджується багаторічними дослідженнями. Імовірність знаходження  $g$ -го співробітника в точках  $(x, y)$ :

$$P_{V_g}(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta_g^2} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-X_g)^2}{\delta_g^2} + \frac{(y-Y_g)^2}{\delta_g^2}\right]} \quad (3.48)$$

Відповідно до цього індивідуальний ризик розраховується за формулою:

$$R_g = \sum_{x_n} \sum_{y_n} P_{V_g}(x_n, y_n) R_E(x_n, y_n), \quad (3.49)$$

де  $(x_n, y_n)$  визначаються екранним растром як сітка з кроком  $h$ :

$$h = \frac{\max(H, W)}{100}, \quad (3.50)$$

де  $H$  – довжина;  $W$  – ширина робочої площі.

Соціальний ризик, тобто імовірність загибелі  $k$  людей, задається залежністю:

$$R_k = \sum_{g=1}^{C_V} \left[ \sum_{x_n} \sum_{y_n} P_{V_g}(x_n, y_n) R_E(x_n, y_n) \right] \quad (3.51)$$

Для розрахунку індивідуального і соціального ризику на техногенному об'єкті на основі представленої математичної моделі необхідні вихідні дані для розрахунку. Ці дані приймаються з урахуванням специфіки АГЗС і включають параметри наведені на рисунку 3.6.

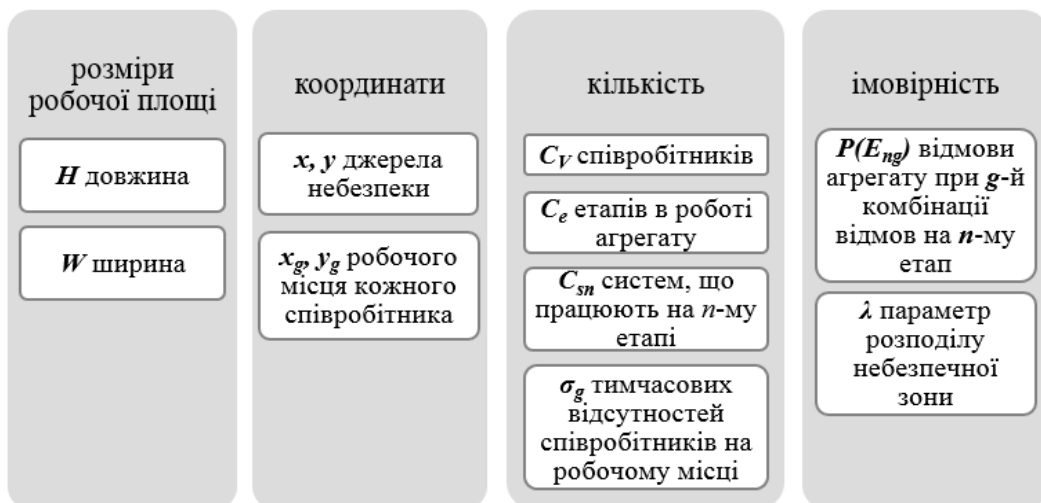


Рис. 3.6 Вихідні дані для математичної моделі оцінки ризику порушення штатного функціонування інформаційної системи АГЗС

На основі заданих параметрів і прийнятих математичних залежностей розраховують: імовірність аварії на небезпечному техногенному об'єкті, розподіл персоналу і небезпечної зони по об'єкту, а також індивідуальний і соціальний ризику [145]. Результати розрахунку виводяться у вікні ІС АГЗС в графічній формі у вигляді розподілу ризику персоналу і небезпечних зон по робочій площі (рис. 3.7).

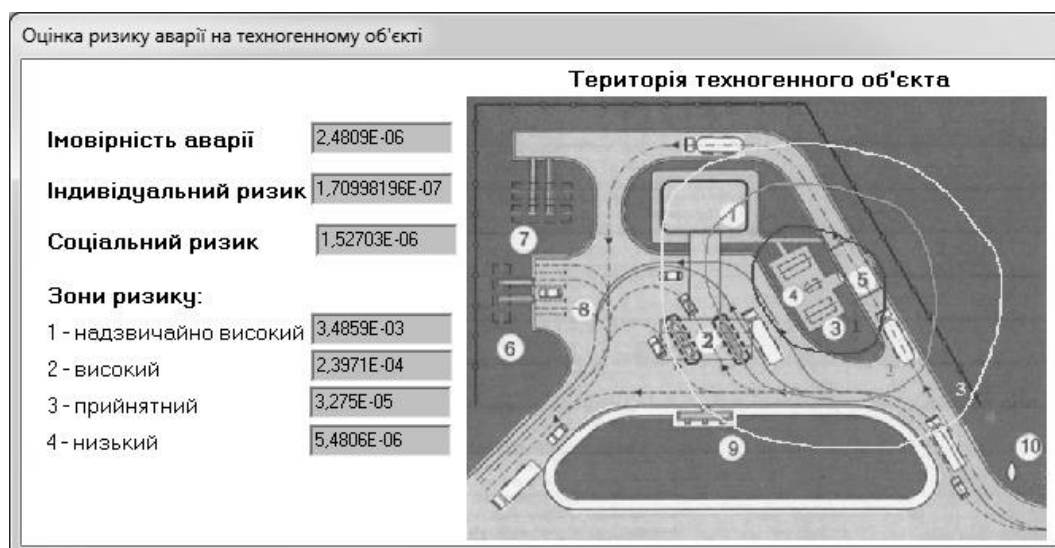


Рис. 3.7 Розподіл зон ризику на території АГЗС

Напрямок розвитку розглянутого імовірнісного методу слід вважати дослідження змін параметра небезпечної зони  $\lambda$ , що характеризує вплив небезпечних факторів (ударна хвиля, дифузія токсичних речовин, розліт уламків від вибуху, тощо), а також уточнення параметра експоненціального розподілу за фактичними даними про параметр небезпечної зони.

### 3.6 Висновки до розділу 3

Удосконалено метод оцінки соціального ризику із застосуванням нейронних мереж. Результати роботи інформаційної системи були порівняні з результатами навчання нейронної мережі, що визначає значення відстані, на якій досягається прийнятний рівень соціального ризику, із встановленням

відносного відхилення розрахунків (1,35 %). Це дозволило зробити висновок про те, що нейронна мережа, навчена за даною технологією, дає результат, близький до результату роботи інформаційної системи на основі представленого методу.

Вперше запропоновано метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій, який дозволяє виконувати обчислення на основі багатозначної логіки для обробки знань, що містять елементи невизначеності. Реалізація даного методу припускає рішення як розрахункових, так і логіко-аналітичних завдань, що обумовлено застосуванням методів штучного інтелекту.

Формалізація завдання розпізнавання ситуацій на основі аксіоматичного підходу, припускає побудову формальної теорії предметної області в рамках конструктивної формальної системи. Формалізована аксіоматична теорія дозволяє розглядати АГЗС як складну динамічну систему, що складається з об'єктів різної природи, сукупність яких разом з їхніми можливими відображеннями визначають відповідність ситуацій описуваному ризику. Також розроблений формальний апарат дозволяє перенести отриманий формальний опис предметної області до інформаційної технології та використати його при обробці інформації про стан АГЗС.

Розглянуто аналітичну модель «доза – ефект» для опису впливу негативних факторів на людину. Імовірності переходу аварії на різні гілки дерева відмов визначалися за статистичними даними, а умовні імовірності ураження людини – за значеннями пробіт-функції.

Для визначення масштабів негативного впливу від виникнення аварії на АГЗС використовувались оцінки індивідуального, територіального і соціального ризиків. Підсумовуючи індивідуальні ризики по всій території регіону, визначається індивідуальний ризик проживання в ньому, обумовлений можливими аваріями на АГЗС.

Пропонований метод кількісної оцінки ризику порушення штатного функціонування інформаційної системи АГЗС дозволяє прогнозувати розподіл



небезпечних зон при аварії; імовірнісний розподіл працівників на об'єкті при аварії; індивідуальний і соціальний ризики для працівників на виробничій площі. Прогнозування ризику дає можливість інформувати працівників про ризик, підвищувати ефективність розроблюваних заходів захисту персоналу при аварії, а також запобігати негативним наслідкам аварій.

Результати, подані в розділі, автор опублікував у працях [11, 12, 13, 14, 15].

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АГЗС

#### 4.1 Структура та опис модулів середовища експериментальних досліджень

Завдання забезпечення безпеки, як правило, вирішуються в умовах жорсткого дефіциту часу. Обмеженість часових і матеріально-технічних ресурсів, а також можливостей людини при великих масштабах і швидкості розвитку НС впливають на адекватність і достовірність інформації, що використовується при прийнятті рішень, а також на оперативність прийняття цих рішень. Ці аспекти зумовлюють необхідність використання для вирішення завдань безпеки сучасних технологій автоматизованого збору, обробки, аналізу і візуалізації інформації.

Таким чином, заходом, спрямованим на підвищення ефективності забезпечення безпеки населення, є впровадження в процеси управління новітніх інформаційних технологій. Кінцевою метою створення та впровадження ІС є підвищення надійності АГЗС. Процеси інформаційної підтримки прийняття рішень відображені на рис.4.1.

Вихідною інформацією, необхідною для прийняття управлінських рішень в сфері забезпечення безпеки АГЗС є:

- достовірні дані про поточний стан об'єкту управління;
- критичні значення параметрів, що характеризують стан об'єкту управління;
- архівні дані про об'єкт управління;
- прогнозна інформація про тенденції та перспективи змін стану об'єкту, отримана з використанням математичних моделей.



Рис.4.1. Процеси інформаційної підтримки прийняття рішень

Суттєвою особливістю ІС підвищення надійності АГЗС є складна ієрархічна структура керуючого об'єкта, окремі елементи якого взаємодіють між собою як в ході повсякденної діяльності, так і при ліквідації НС.

Основним завданням управління є забезпечення такої експлуатації АГЗС, яка дозволила б мінімізувати ймовірність виникнення аварії внаслідок відмов обладнання та помилок обслуговуючого персоналу, а також надання рекомендацій щодо зниження масштабів і / або ліквідації наслідків аварії при її виникненні.

Процес управління ризиком передбачає оцінку і аналіз потенційних небезпек, а також пошук заходів, що дозволяють знизити ризики до прийняттого рівня. Управління ризиком виникнення аварій на АГЗС може бути реалізовано тільки при наявності інформації про:

- просторове розташування об'єктів АГЗС і взаємозв'язки між ними;
- технічні характеристики всього обладнання АГЗС;
- потенційно небезпечні фактори, їх вплив на обладнання та персонал, можливі наслідки їх прояву;

- комплекс моделей, що дозволяють оцінювати вплив небезпечних факторів на обладнання та персонал, оцінювати масштаби можливої шкоди;
- моделі розвитку небезпечних ситуацій (аварій) і критеріїв прийняття рішень з управління ризиком.

Рішення задач аналізу ризику можливо тільки при використанні спеціалізованих інформаційних систем, що реалізують в собі функції зберігання і обробки масивів даних, моделювання і виконання розрахункових завдань, представлення результатів у наочній графічній формі, вироблення порад і рекомендацій особам, які приймають рішення з управління ризиками та ліквідації аварій і т.д. Таким чином, для вирішення завдань управління ризиком було створено ІС підвищення надійності АГЗС, орієнтовану на вирішення завдань інформаційної підтримки процесів управління ризиками при експлуатації АГЗС.

ІС забезпечує:

- реалізацію моделей надійності і безпеки технологічного обладнання;
- оцінку безпеки і надійності обладнання для вироблення рекомендацій щодо зниження ризику виникнення аварій;
- розробку сценаріїв розвитку аварій, вибір критеріїв моделювання та оцінки результатів;
- моделювання розвитку аварій, включаючи вибухи, пожежі і комбіновані аварії;
- оцінку збитку при аваріях і відмовах устаткування, включаючи людські втрати, руйнування обладнання, установок і споруд;
- оцінку різних видів ризику, визначення полів ризику;
- візуальне відображення результатів моделювання і оцінки з використанням графіків і діаграм.

Результати виконаних розрахунків і оцінок є основою для підготовки рішень з управління ризиком.

Функціональна схема інформаційної технології (рис. 4.2) включає наступні модулі:

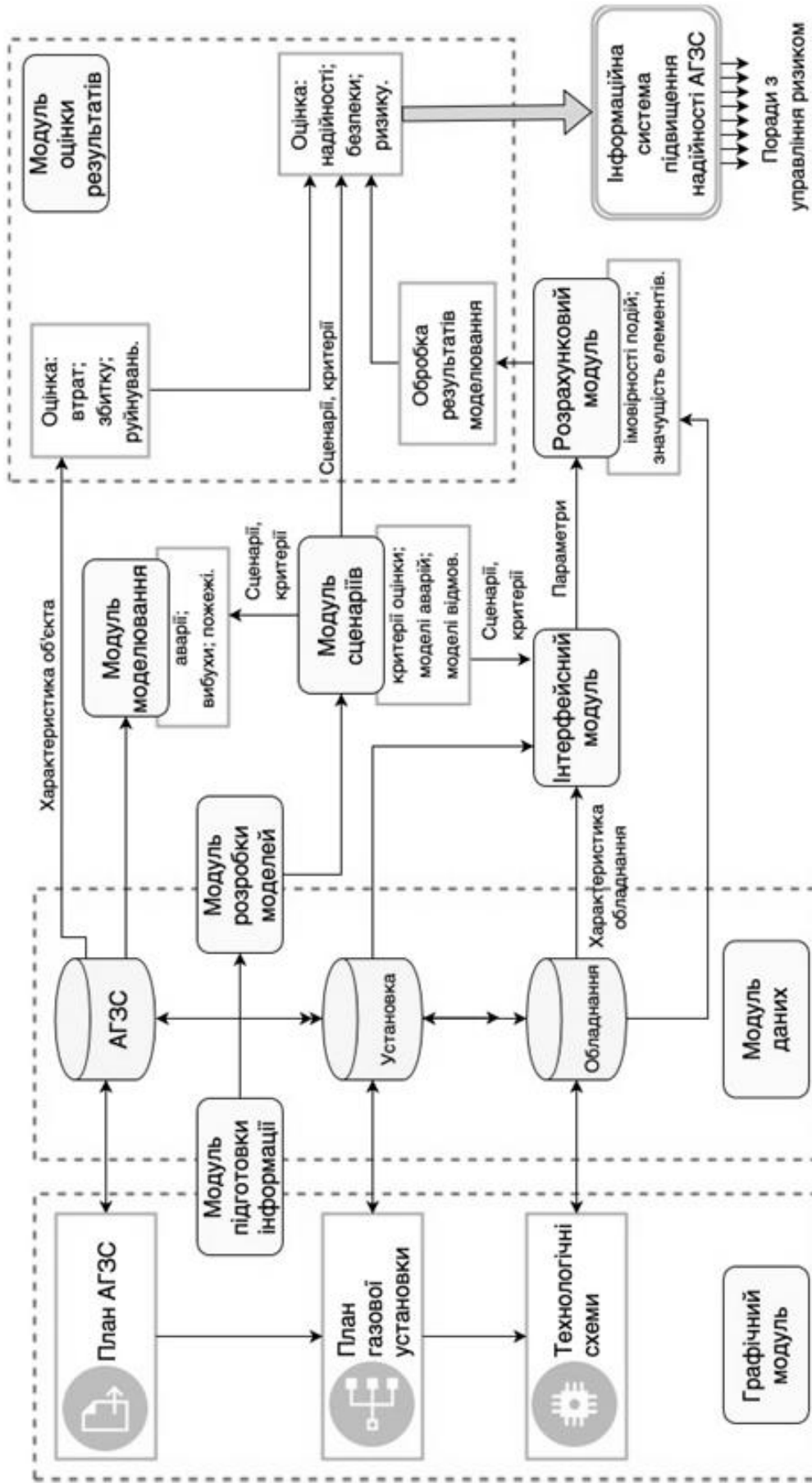


Рис. 4.2 Функціональна схема інформаційної технології підвищення надійності ІС АГЗС

- *модуль підготовки інформації*, що забезпечує формування бази даних з обладнання, структурних і технологічних схем установок, вузлів і блоків;
- *модуль розробки моделей*, що забезпечує процеси розробки уніфікованого комплексу моделей надійності обладнання;
- *модуль сценаріїв*, що дозволяє описувати сценарії аварій (відмов) і визначати критерії моделювання;
- *модуль моделювання наслідків аварій, вибухів і пожеж*;
- *модуль оцінки результатів моделювання*, що виконує аналіз наслідків аварій і розрахунок інтегральних показників надійності, безпеки і ризику;
- *розрахунковий модуль*, призначений для вирішення завдань моделювання надійності та безпеки обладнання;
- *інтерфейсний модуль*, призначений для підготовки даних необхідних для роботи розрахункового блоку;
- *графічний модуль*, призначений для візуального графічного відображення інформації;
- *модуль даних*, призначений для зберігання інформації необхідної для роботи системи. Основою модулю даних є автоматизована база даних, що містить відомості про об'єкти і обладнання АГЗС.

Інтерфейсний модуль забезпечує підготовку і передачу в розрахунковий модуль всіх необхідних відомостей, що дозволяють виконати моделювання для розробленого сценарію. Моделювання в розрахунковому модулі виконується на підставі аналізу дерева відмов, розробленого на основі опису технологічного процесу і систем протиаварійного захисту.

Розрахунковий модуль на основі технологічних параметрів АГЗС, а також параметрів навколишнього середовища, використовуючи алгоритми розрахунку параметрів аварійних ситуацій дозволяє здійснити розрахунки ймовірностей уражаючих факторів та їх масштаби, а також оцінити рівні територіального, індивідуального та соціального ризиків (рис. 4.3).

На виході розрахункового модулю виходять такі результати:

- ймовірності виконання / невиконання заданого сценарію з

урахуванням обраних критеріїв оцінки;

– значущі або рольові функції різних вузлів при реалізації заданого сценарію.

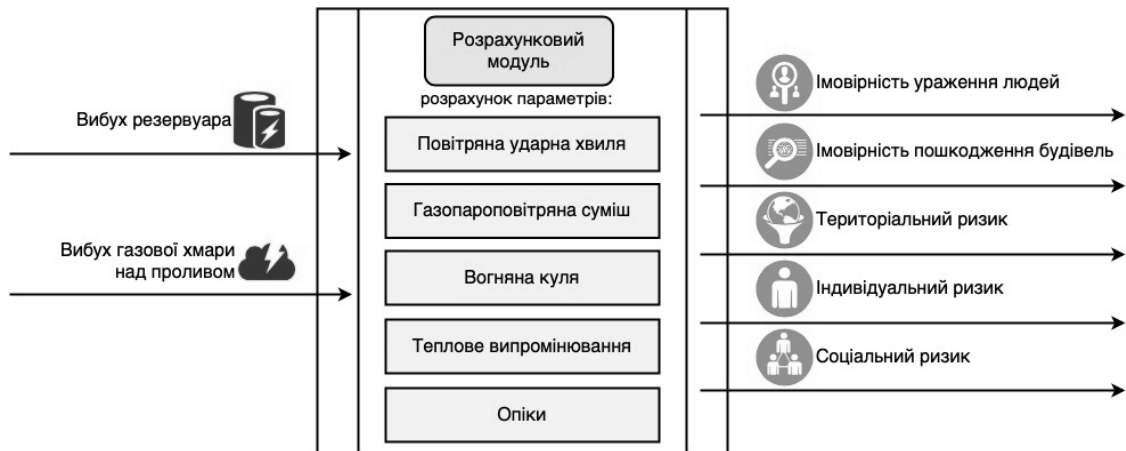


Рис. 4.3 Структура розрахункового модуля ІС

Модуль моделювання, за заданим сценарієм аварії, забезпечує розрахунок можливих масштабів аварії, оцінку втрат і руйнувань об'єктів АГЗС з урахуванням заданих критеріїв оцінки.

Модуль оцінки виконує аналіз результатів, отриманих при роботі модулю моделювання та розрахункового модулю, розрахунок інтегральних показників надійності, безпеки і ризику з урахуванням заданих сценаріїв і критеріїв оцінки.

Узагальнені оцінки передаються в систему інформаційної підтримки з управління ризиком, яка забезпечує вироблення порад і рекомендацій з:

- організації технічного обслуговування і ремонту устаткування;
- проведення заходів щодо підвищення надійності та безпеки обладнання і технологічних процесів;
- організації заходів щодо захисту персоналу від небезпечних факторів;
- реалізації заходів щодо запобігання розвитку комплексних аварій.

В основі ІС лежать концепції єдиного інформаційного простору і відкритих систем. Концепція єдиного інформаційного простору передбачає використання загальних для всіх модулів структур даних, способів подання та інтерпретації моделей і критеріїв. Концепція відкритих систем передбачає

можливість нарощування ІС для вирішення конкретних завдань користувача за рахунок використання налаштувань протоколів обміну інформацією та мережевих технологій.

## 4.2 Експериментальне дослідження роботи інформаційної системи АГЗС

Проведення експериментальних досліджень виконувалось у створеній за інформаційною технологією інформаційній системі, яка дозволяє розрахувати показники імовірностей реалізації сценаріїв аварії на основі методу дерева відмов. Отримані імовірності слугують основою для оцінки індивідуального, територіального і соціального ризиків, а також наслідків аварій на АГЗС. Ці оцінки дозволяють обґрунтовано приймати ефективні рішення щодо безпечного функціонування АГЗС.

В подальших розрахунках будуть використані наступні умовні позначення:

$t$  – температура навколишнього середовища, °С;

$V_{res}$  – ємність резервуарів, м<sup>3</sup>;

$V_{avt}$  – ємність автоцистерни, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – щільність зрідженого пропану, кг/м<sup>3</sup>;

$C_0$  – швидкість звуку в повітрі, м/с;

$C_g$  – концентрація пропану в хмарі, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{st}$  – стехіометрична концентрація пропану в суміші з повітрям, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коректувальний параметр, що характеризує фугасні властивості пропану;

$h$  – висота проливу, м;

$P_0$  – атмосферний тиск, Па;

$P$  – абсолютний тиск, Па.



Внесемо вихідні дані в інформаційну систему (рис. 4.4):

Повітряна ударна хвиля від вибуху резервуару

Тип палива: пропан

Агрегатний стан суміші: газ

Навколишнє середовище: 3 - відкрите

Клас палива: 2 - чутливі речовини

Температура навколишнього середовища °C: 20

Ємність резервуарів, м<sup>3</sup>: 10

Ємність автоцистерни, м<sup>3</sup>: 12

Заповнення резервуарів за об'ємом, %: 85

Щільність палива, кг/м<sup>3</sup>: 530

Концентрація парів у хмарі, кг/м<sup>3</sup>: 2,2

Стехіометрична концентрація парів палива, кг/м<sup>3</sup>: 4,03

Коректувальний параметр фугасних властивостей: 1,05

Висота проливу, м: 0,05

Швидкість звуку в повітрі, м/с: 340

Атмосферний тиск, Па: 101325

Абсолютний тиск, Па: 1600000

Розрахувати параметри

Рис. 4.4 Вхідні дані для розрахунку параметрів повітряної ударної хвилі від вибуху резервуару

Виконаємо подальший розрахунок індивідуального, територіального, соціального ризиків та наслідків можливих аварій на АГЗС.

Знаходимо загальний об'єм палива, м<sup>3</sup>:

$$V = 0.85 \cdot (V_{res} + V_{avt})$$

Знаходимо загальну масу палива, кг:

$$m = 0.85 \cdot V \cdot \rho$$

Визначаємо площу можливого проливу, м<sup>2</sup>:

$$F_p = \frac{0.85 \cdot V}{h}$$

Визначаємо масу палива, що утримується в хмарі, кг:

$$M_g = V \cdot \rho$$

Визначаємо питому теплоту згоряння палива, Дж/кг:

$$q = 44 \cdot 10^6 \cdot \beta$$

Визначаємо щільність пропану в ємностях:

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^{0.8},$$

де  $\rho_0$  – щільність газової фази палива, кг/м<sup>3</sup>.

Знаходимо загальну масу пари палива, кг:

$$m_1 = V \cdot \rho_1$$

Визначаємо коефіцієнти  $I$  та  $J$  в залежності від фізичного стану речовини:

$J = 1$  – хмара лежить на землі,

$J = 0$  – в іншому випадку.

$I = 1$  – гетерогенна ППС,

$I = 0$  – газова ППС.

В нашому випадку  $J = 1$  та  $I = 0$ .

Значення коефіцієнтів в залежності від класу горючої речовини та виду навколишнього середовища встановлюються наступні:

$$\begin{aligned} K_1 = 0, \quad K_2 = 1, \quad K_3 = 0, \quad K_4 = 0, \\ WP_1 = 0, \quad WP_2 = 0, \quad WP_3 = 1, \quad WP_4 = 0. \end{aligned}$$

Визначаємо ефективний енергозапас ППС, Дж:

$$E = \begin{cases} 2 \cdot M_g \cdot q & \text{при } C_g < C_{st} \text{ і } J = 1 \\ 2 \cdot M_g \cdot q \cdot \frac{C_{st}}{C_g} & \text{при } C_g > C_{st} \text{ і } J = 1 \\ M_g \cdot q & \text{при } C_g < C_{st} \text{ і } J = 0 \\ M_g \cdot q \cdot \frac{C_{st}}{C_g} & \text{при } C_g > C_{st} \text{ і } J = 0 \end{cases}$$

За експертною таблицею визначаємо очікуваний режим вибухового перетворення хмари ППС – детонація або дефлеграція з діапазоном видимої швидкості фронту полум'я  $V_g$ :

$$V_g = \left\{ \begin{array}{l} 500 \text{ нпу } K_1 = 1 \text{ і } WP_1 = 1 \\ 500 \text{ нпу } K_2 = 1 \text{ і } WP_1 = 1 \\ 500 \text{ нпу } K_3 = 1 \text{ і } WP_1 = 1 \\ 300 \text{ нпу } K_4 = 1 \text{ і } WP_1 = 1 \\ 500 \text{ нпу } K_1 = 1 \text{ і } WP_2 = 1 \\ 500 \text{ нпу } K_2 = 1 \text{ і } WP_2 = 1 \\ 300 \text{ нпу } K_3 = 1 \text{ і } WP_2 = 1 \\ 200 \text{ нпу } K_4 = 1 \text{ і } WP_2 = 1 \\ 500 \text{ нпу } K_1 = 1 \text{ і } WP_3 = 1 \\ 300 \text{ нпу } K_2 = 1 \text{ і } WP_3 = 1 \\ 200 \text{ нпу } K_3 = 1 \text{ і } WP_3 = 1 \\ 43 \cdot \sqrt[6]{M_g} \text{ нпу } K_4 = 1 \text{ і } WP_3 = 1 \\ 300 \text{ нпу } K_1 = 1 \text{ і } WP_4 = 1 \\ 200 \text{ нпу } K_2 = 1 \text{ і } WP_4 = 1 \\ 43 \cdot \sqrt[6]{M_g} \text{ нпу } K_3 = 1 \text{ і } WP_4 = 1 \\ 26 \cdot \sqrt[6]{M_g} \text{ нпу } K_4 = 1 \text{ і } WP_4 = 1 \end{array} \right.$$

Для обчислення параметрів повітряної ударної хвилі на заданій відстані  $R$  від центру хмари спочатку розраховуємо відповідну безрозмірну відстань:

$$Rx_1(r) = \frac{r}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$Rx(r) = \begin{cases} 0.34 \text{ нпу } Rx_1(r) < 0.34 \\ Rx_1(r) \text{ нпу } Rx_1(r) > 0.34 \end{cases}$$

Розраховуємо параметри вибухової хвилі – безрозмірний тиск ( $Px_1$ ) та імпульс фази стиску ( $Ix_1$ ):

$$Px_1(r) = \left(\frac{V_g}{C_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma}\right) \cdot \left(\frac{0.83}{Rx(r)} - \frac{0.14}{(Rx(r))^2}\right)$$

$$Ix_1(r) = \left(\frac{V_g}{C_0}\right) \cdot \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma}\right) \cdot \left(1 - 0.4 \cdot \left(\frac{V_g}{C_0}\right) \cdot \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma}\right)\right) \cdot \left(\frac{0.06}{Rx(r)} + \frac{0.01}{(Rx(r))^2} - \frac{0.0025}{(Rx(r))^3}\right),$$

де  $\sigma$  – ступінь розширення продуктів згоряння, визначається як:

$$\sigma = \begin{cases} 4 & \text{при } I = 1 \\ 7 & \text{при } I = 0 \end{cases}$$

Для подальших розрахунків оцінюється агрегатний стан паливної суміші. Для пропану при температурі +20°C суміш можна вважати газовою. У випадку детонації розраховуємо параметри хмари газової ППС –  $Px_2$  та  $Ix_2$ :

$$Px_2(r) = \begin{cases} \frac{0.125}{Rx_1(r)} + \frac{0.137}{(Rx_1(r))^2} + \frac{0.023}{(Rx_1(r))^3} & \text{при } Rx_1(r) > 0.25 \text{ і } I = 1 \\ 18 & \text{при } Rx_1(r) < 0.25 \text{ і } I = 1 \\ 18 & \text{при } Rx_1(r) < 0.2 \text{ і } I = 0 \\ e^{-1.124 - 1.66 \ln(Rx_1(r)) + 0.26 (\ln(Rx_1(r)))^2} & \text{при } 0.2 < Rx_1(r) < 24 \text{ і } I = 0 \end{cases}$$

$$Ix_2(r) = \begin{cases} \frac{0.222}{Rx_1(r)} & \text{при } Rx_1(r) > 0.25 \text{ і } I = 1 \\ 0.16 & \text{при } Rx_1(r) < 0.25 \text{ і } I = 1 \\ e^{-3.4217 - 0.898 \ln(0.142) - 0.0096 (\ln(0.142))^2} & \text{при } Rx_1(r) < 0.2 \text{ і } I = 0 \\ e^{-3.4217 - 0.898 \ln(Rx_1(r)) - 0.0096 (\ln(Rx_1(r)))^2} & \text{при } 0.2 < Rx_1(r) < 24 \text{ і } I = 0 \end{cases}$$

Остаточні значення величин тиску та імпульсу фази стиску обираються з умов:

$$Px(r) = \min(Px_1(r), Px_2(r))$$

$$Ix(r) = \min(Ix_1(r), Ix_2(r))$$

Після визначення безрозмірних величин тиску та імпульсу фази стиску обчислюються відповідні їх розмірні величини:

$$\Delta P(r) = Px(r) \cdot P_0$$

$$I(r) = \frac{Ix(r) \cdot P_0^{\frac{2}{3}} \cdot E^{\frac{1}{3}}}{C_0}$$

Результати розрахунків та графіки залежностей надлишкового тиску та питомого імпульсу від відстані представлені на рисунку 4.5.

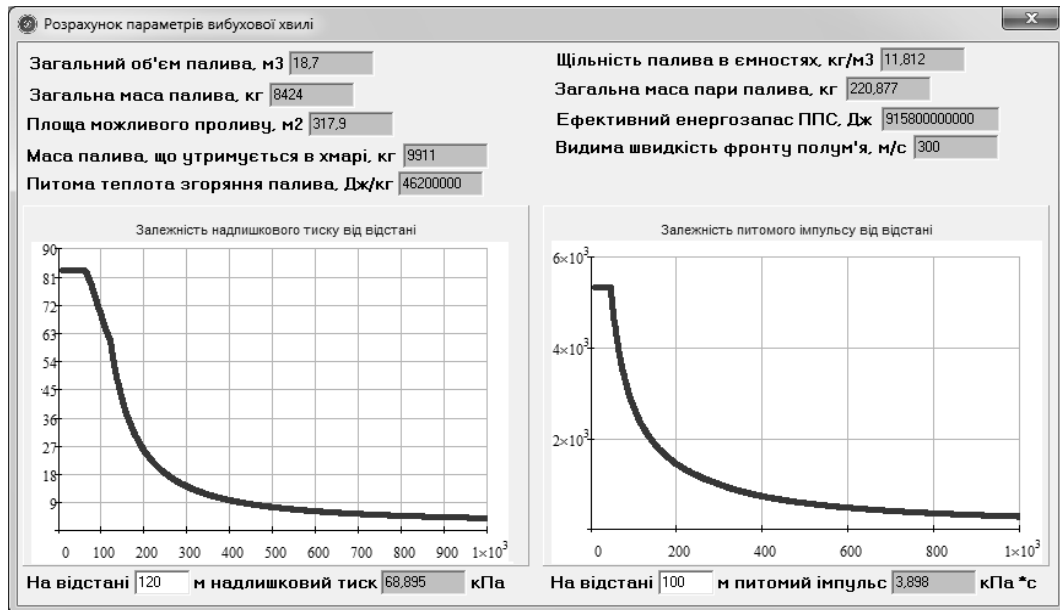


Рис. 4.5 Розрахунок параметрів вибухової хвилі

### Визначення додаткових характеристик вибуху ППС

Реальний розподіл площини факторів ураження на рисунку 4.5 не має чіткої межі. При наближенні параметрів хвилі до межі небезпечної області імовірність заданого рівня наростає від 0 до 100%. При перевищенні цього рівня досягається 100% імовірність ураження. Цю особливість можна відобразити за допомогою пробіт-функції.

1. Імовірність пошкодження стін промислових будівель, при яких можливе відновлення без їх знесення.

Величина імовірності ураження (ефект ураження) виражається функцією Гауса (функцією помилок) та вимірюється в долях одиниці ( $Ppor$ ).

Верхньою межею інтегральної функції є так звана пробіт-функція ( $Pr$ ).

$$V_1(r) = \left( \frac{17500}{\Delta P(r)} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{I(r)} \right)^{9.3}$$

$$Pr_1(r) = 5 - 0.26 \cdot \ln(V_1(r))$$

$$Ppor_1(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_1(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Територіальний ризик ( $Rt_1$ ) обчислюємо за формулою:

$$Rt_1(r) = Ppor_1(r) \cdot Pck \cdot Ppr,$$

де  $P_{ck}$  – імовірність руйнування будівель,  $P_{pr}$  – імовірність вибуху пропану.

За узагальненими статистичними даними  $P_{ck} = 10^{-4}$ . Індивідуальний ризик ( $R_i$ ) обчислюємо за формулою:  $R_i(r) = R_t(r) \cdot P_n$ ,

де  $P_n$  – імовірність знаходження людини в даній точці простору.

$$P_n = \frac{48 \cdot 60}{52 \cdot 168} = 0,33,$$

де: 48 – кількість робочих тижнів на рік; 52 – всього тижнів на рік; 168 – кількість годин на тиждень; 60 – кількість годин на тиждень, коли людина зазнає ризику (так як працівник працює за тризмінним графіком, а зміна складає 24 години).

Графіки залежностей імовірності пошкодження стін промислових будівель без їх знесення від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.6.

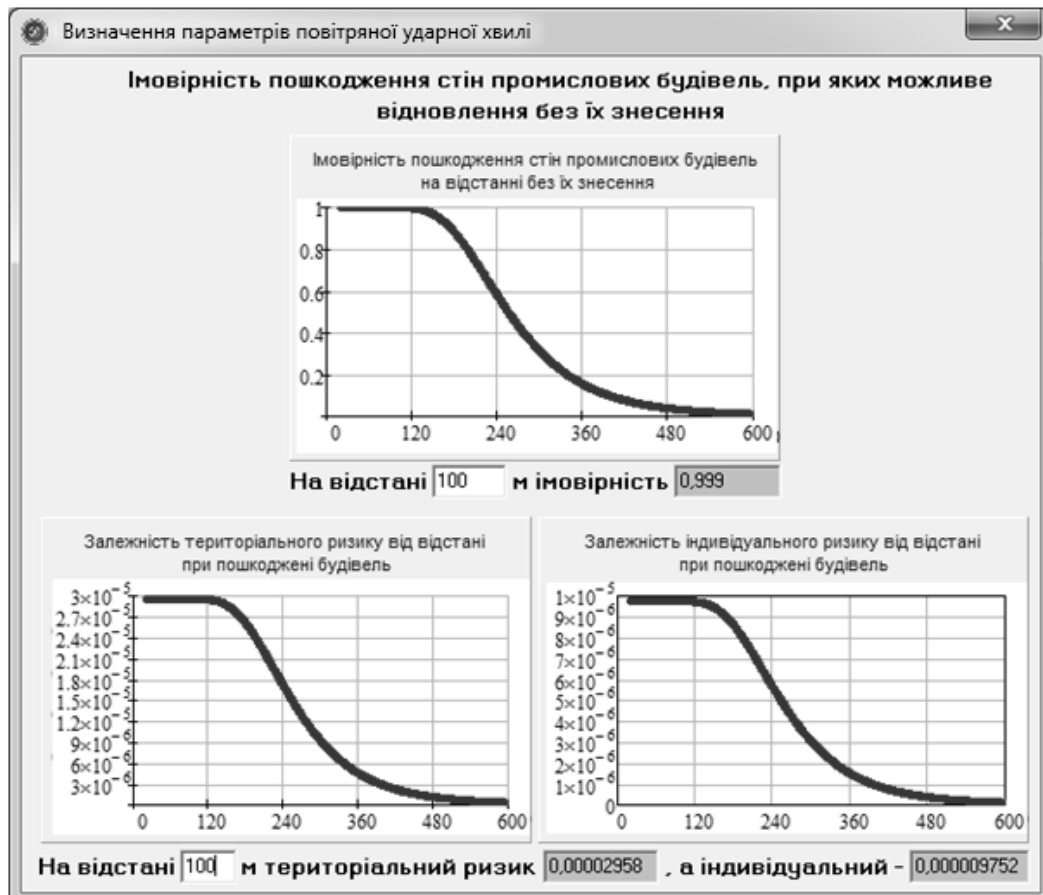


Рис. 4.6 Імовірність пошкодження стін промислових будівель, при яких можливе відновлення без їх знесення

2. Імовірність руйнування промислових будівель, при якому вони підлягають знесенню:

$$V_2(r) = \left( \frac{40000}{\Delta P(r)} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I(r)} \right)^{11.3}$$

$$Pr_2(r) = 5 - 0.22 \cdot \ln(V_2(r))$$

$$Ppor_2(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_2(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Обчислюємо територіальний ( $Rt_2$ ) ризик:  $Rt_2(r) = Ppor_2(r) \cdot Pck \cdot Ppr$

За узагальненими статистичними даними  $Pck = 10^{-5}$ . Індивідуальний ( $Ri_2$ ) ризик обчислюємо за формулою:  $Ri_2(r) = Rt_2(r) \cdot Pn$ .

Графіки залежностей імовірності руйнування промислових будівель, при якому вони підлягають знесенню, від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.7.

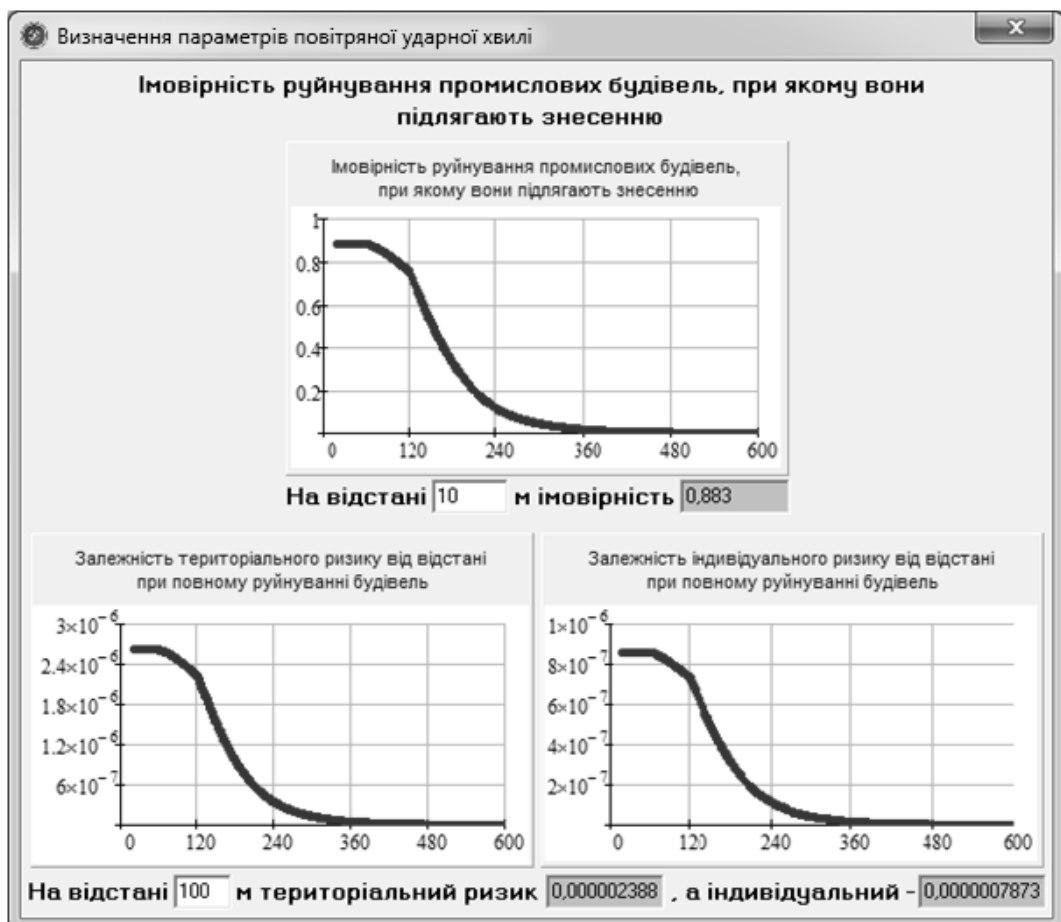


Рис. 4.7 Імовірність руйнування промислових будівель, при якому вони підлягають знесенню

3. Імовірність тривалої втрати керованості у людей, що потрапили в зону дії ударної хвилі при вибуху хмари ППС.

Безрозмірні тиск та імпульс задаємо за допомогою виразів:

$$p(r) = 1 + \frac{\Delta P(r)}{P_0}$$

$$i(r) = \frac{I(r)}{\sqrt{P_0} \cdot \sqrt[3]{m}}$$

$$V_3(r) = \frac{4.2}{p(r)} + \frac{1.3}{i(r)}$$

$$Pr_3(r) = 5 - 5.74 \cdot \ln(V_3(r))$$

$$Ppor_3(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_3(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt ,$$

де  $m$  – маса тіла людини (в середньому дорівнює 80), кг.

Графік залежності імовірності тривалої втрати керованості у людей, що потрапили в зону дії ударної хвилі при вибуху хмари ППС, від відстані зображений на рисунку 4.8.

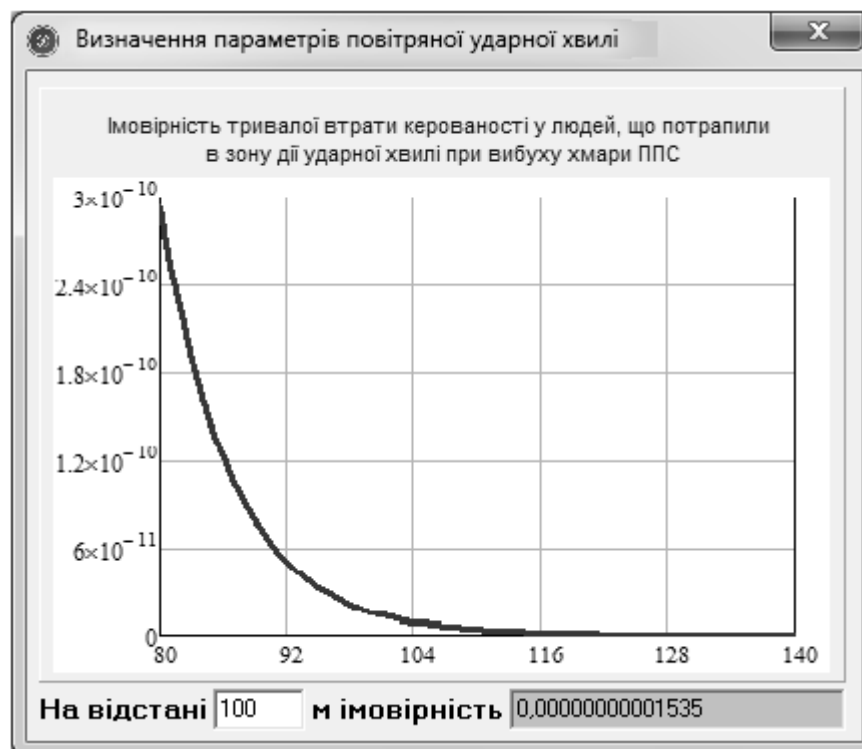


Рис. 4.8 Імовірність тривалої втрати керованості у людей, що потрапили в зону дії ударної хвилі при вибуху хмари ППС



4. Імовірність розриву барабаних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі:

$$Pr_4(r) = -12.6 + 1.524 \cdot \ln(\Delta P(r))$$

$$Ppor_4(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_4(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графік залежності імовірності розриву барабаних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі від відстані зображений на рисунку 4.9.

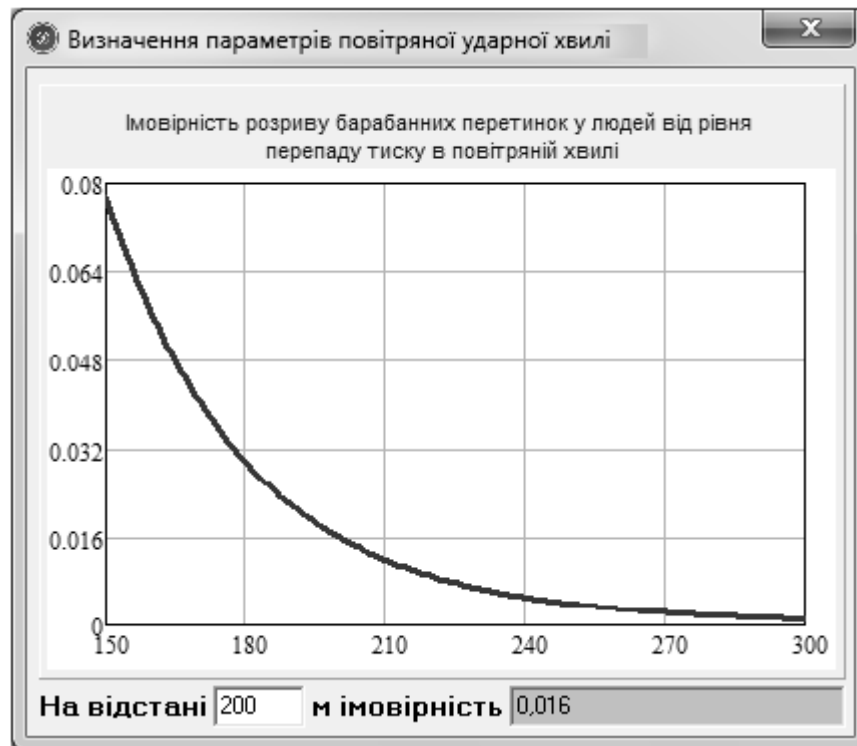


Рис. 4.9 Імовірність розриву барабаних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі

5. Імовірність відкидання людей хвилею тиску:

$$V_5(r) = \frac{7.38 \cdot 10^3}{\Delta P(r)} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{\Delta P(r) \cdot I(r)}$$

$$Pr_5(r) = 5 - 2.44 \cdot \ln(V_5(r))$$

$$Ppor_5(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_5(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графік залежності імовірності відкидання людей хвилею тиску від відстані зображений на рисунку 4.10.

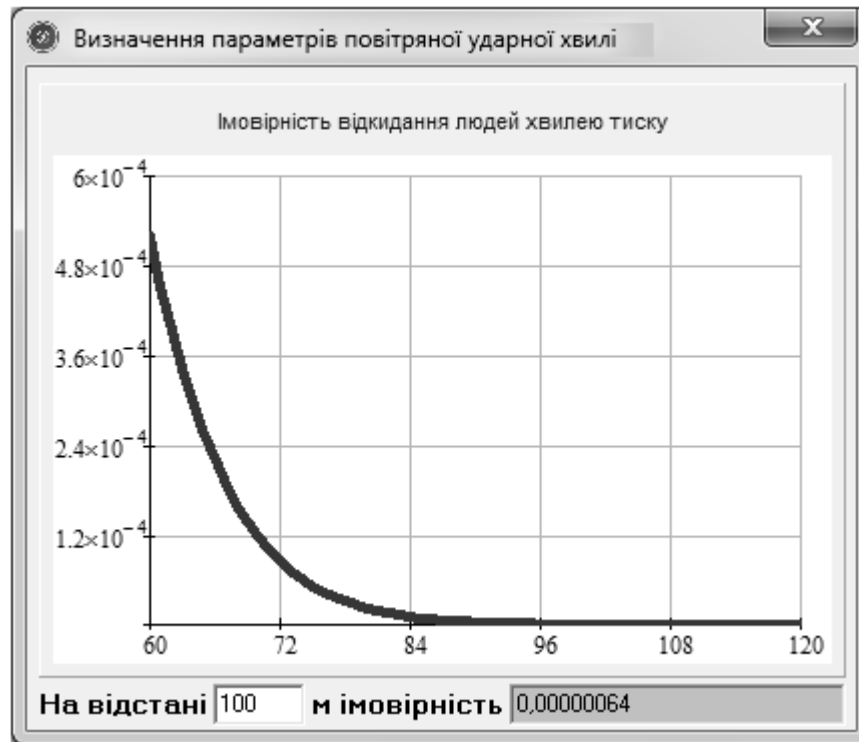


Рис. 4.10 Імовірність відкидання людей хвилею тиску

Отже, на відстані 100 м 99% імовірність пошкоджень і 30% імовірність руйнувань промислових будівель і споруд, 3% імовірність розриву барабанних перетинок у людей. Імовірності інших критеріїв ураження близькі до нуля.

*Розрахунок вибуху газопароповітряної суміші (ГППС) над проливом пропану*

В подальших розрахунках будуть використані наступні умовні позначення:

$z$  – доля приведеної маси парів газу над проливом, які приймають участь у вибуху;

$q_i$  – питома енергія вибуху ТНТ, кДж/кг.

Визначаємо загальний енергетичний потенціал, кДж:

$$E = 2 \cdot M_g \cdot q$$

Визначаємо відносний енергетичний потенціал:

$$Q_b = \frac{\sqrt[3]{E}}{16.534}$$

Знаходимо загальну приведену масу пари палива, кг:

$$m_p = \frac{E}{q}$$

Тоді, величина тротилового еквіваленту становить, кг:

$$W_t = \frac{0.4 \cdot q}{0.9 \cdot q_t} \cdot z \cdot m_p$$

Для розрахунку радіусів зон руйнування використані безрозмірні коефіцієнти, які характеризують дію вибуху на об'єкт:

$k_1 = 3.8$  – повне руйнування будівель;

$k_2 = 5.6$  – 50% будівель зруйновано;

$k_3 = 9.6$  – будівлі непридатні для проживання;

$k_4 = 28$  – помірні руйнування будівель;

$k_5 = 56$  – малі ушкодження будівель.

Базовий радіус зони руйнування (м) визначається як:

$$R_0 = \begin{cases} \frac{\sqrt[3]{W_t}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_t}\right)^2\right)^{\frac{1}{6}}} & \text{при } m_p < 5000 \\ \sqrt[3]{W_t} & \text{при } m_p \geq 5000 \end{cases}$$

Далі знаходимо радіуси зон руйнування з використанням коефіцієнтів:

$$R_i = k_i \cdot R_0$$

Визначаємо величину надлишкового тиску, що розвивається при згорянні ГППС:

$$\Delta P_m(r) = P_0 \cdot \left( 0.8 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p}}{r} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p^2}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_p}{r^3} \right)$$

Визначаємо питомий імпульс вибуху ГППС на різних відстанях:

$$I(r) = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p^2}}{r}$$

Графіки залежностей надлишкового тиску та питомого імпульсу від відстані при вибуху хмари ГППС зображені на рисунку 4.11.

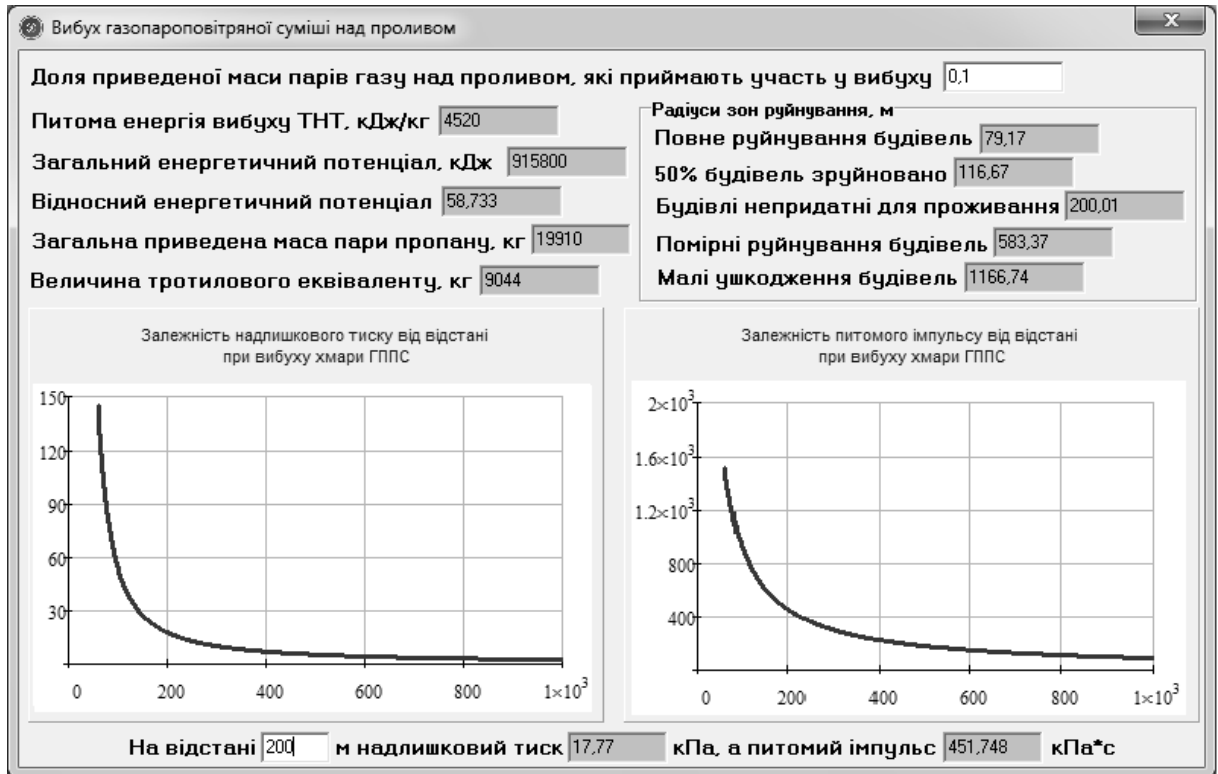


Рис. 4.11 Вибух газопароповітряної суміші над проливом

1. Імовірність пошкодження стін промислових будівель, при яких можливе відновлення без їх знесення:

$$V_1(r) = \left( \frac{17500}{\Delta P_m(r) \cdot 100} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{I(r)} \right)^{9.3}$$

$$Pr_1(r) = 5 - 0.26 \cdot \ln(V_1(r))$$

$$Ppor_1(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_1(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графіки залежностей імовірності пошкодження стін промислових будівель без їх знесення при вибуху ГППС від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.12.

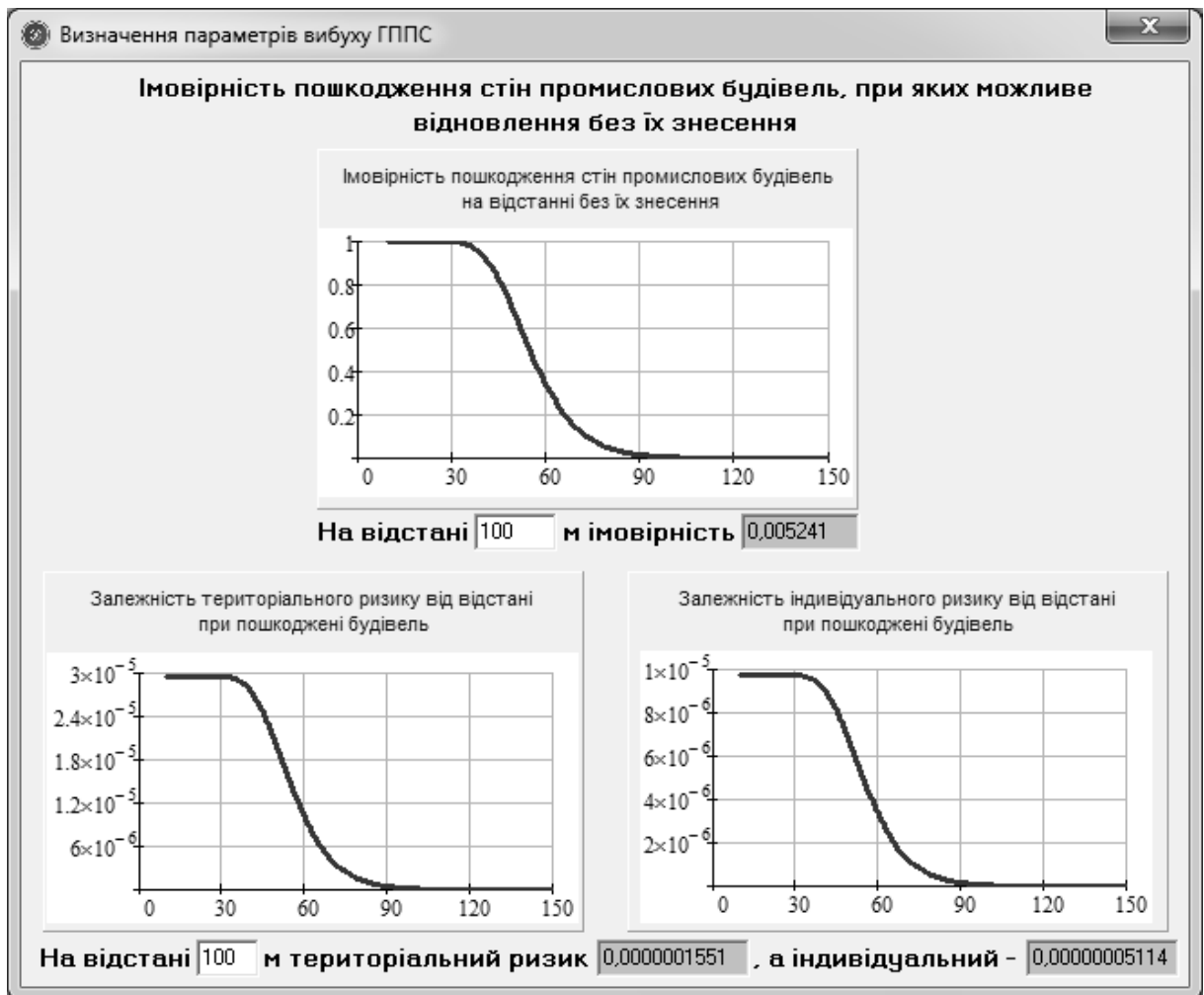


Рис. 4.12 Імовірність пошкодження стін промислових будівель при вибуху ГППС

2. Імовірність руйнування промислових будівель, при якому вони підлягають знесенню:

$$V_2(r) = \left( \frac{40000}{\Delta P_m(r) \cdot 1000} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I(r)} \right)^{11.3.3}$$

$$Pr_2(r) = 5 - 0.22 \cdot \ln(V_2(r))$$

$$Ppor_2(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_2(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графіки залежностей імовірності руйнування промислових будівель, при якому вони підлягають знесенню при вибуху ГППС, від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.13.

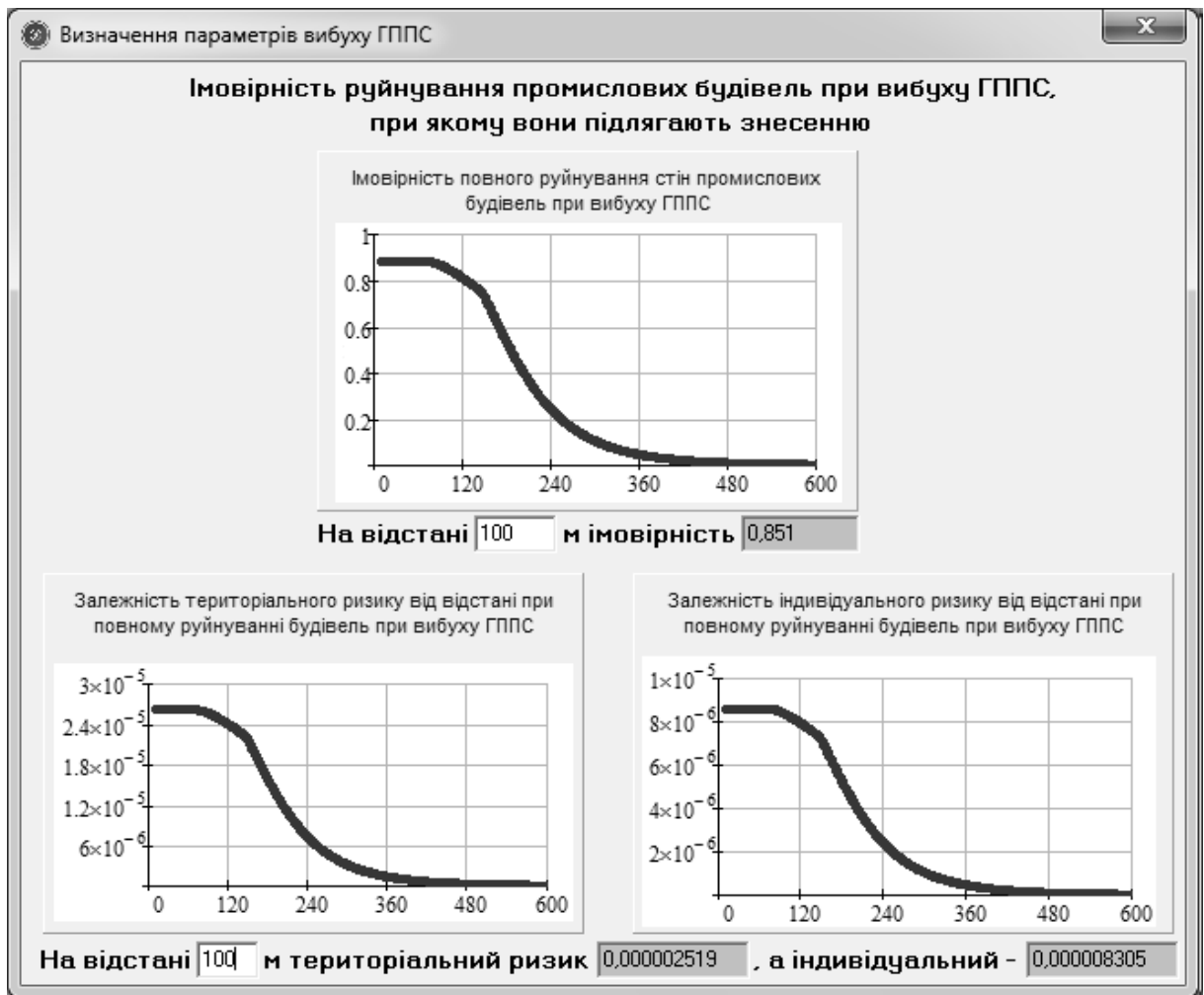


Рис. 4.13 Імовірність повного руйнування стін промислових будівель при вибуху ГППС

3. Імовірність тривалої втрати керованості у людей, що потрапили в зону дії ударної хвилі:

$$p(r) = 1 + \frac{\Delta P_m(r)}{P_0}$$

$$i(r) = \frac{I(r)}{\sqrt{P_0} \cdot \sqrt[3]{m}}$$

$$V_3(r) = \frac{4.2}{p(r)} + \frac{1.3}{i(r)}$$

$$Pr_3(r) = 5 - 5.74 \cdot \ln(V_3(r))$$

$$Ppor_3(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_3(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графіки залежностей імовірності тривалої втрати керованості у людей, що потрапили в зону дії ударної хвилі при вибуху хмари ГППС, від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.14.

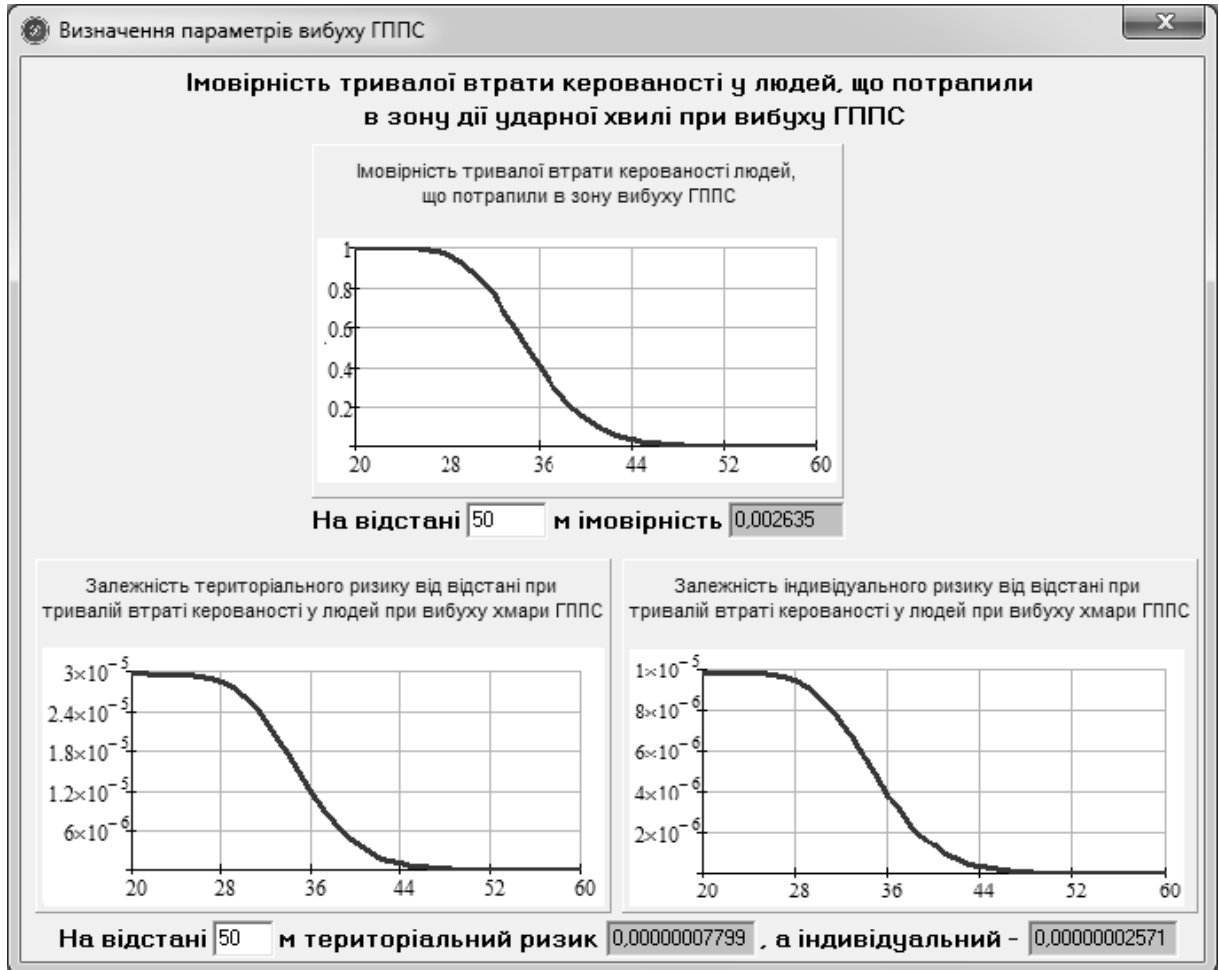


Рис. 4.14 Імовірність тривалої втрати керованості людей, що потрапили в зону вибуху ГППС

4. Імовірність розриву барабаних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі:

$$Pr_4(r) = -12.6 + 1.524 \cdot \ln(\Delta P_m(r) \cdot 1000)$$

$$Ppor_4(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_4(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графіки залежностей імовірності розриву барабаних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі при вибуху хмари ГППС,

від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.15.

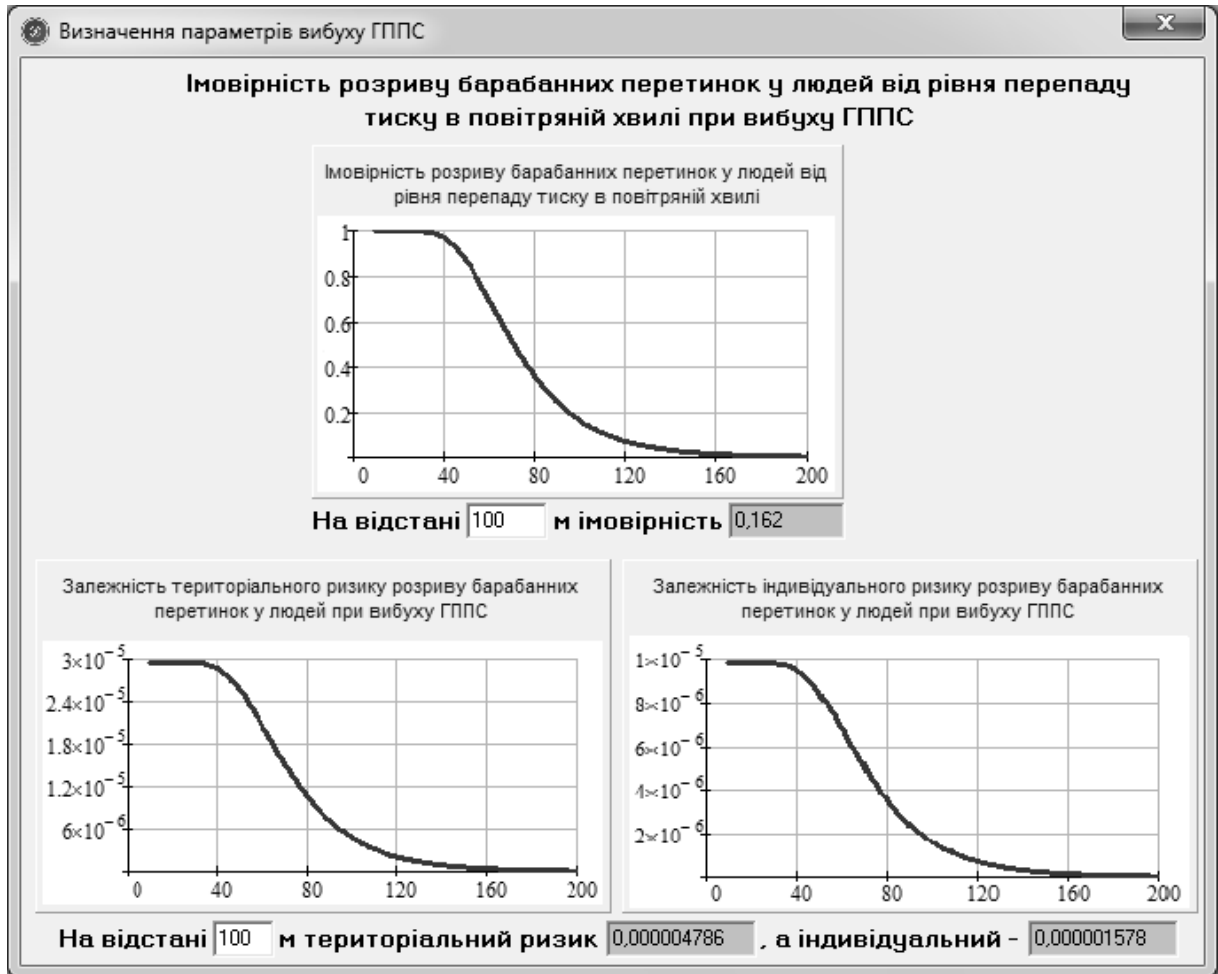


Рис. 4.15 Імовірність розриву барабаних перетинок у людей від рівня перепаду тиску в повітряній хвилі при вибуху ГППС

5. Імовірність відкидання людей хвилею тиску:

$$V_5(r) = \frac{7.38 \cdot 10^3}{\Delta P_m(r) \cdot 1000} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{\Delta P_m(r) \cdot 1000 \cdot I(r)}$$

$$Pr_5(r) = 5 - 2.44 \cdot \ln(V_5(r))$$

$$Ppor_5(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_5(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графіки залежностей імовірності відкидання людей хвилею тиску при вибуху хмари ГППС від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.16.



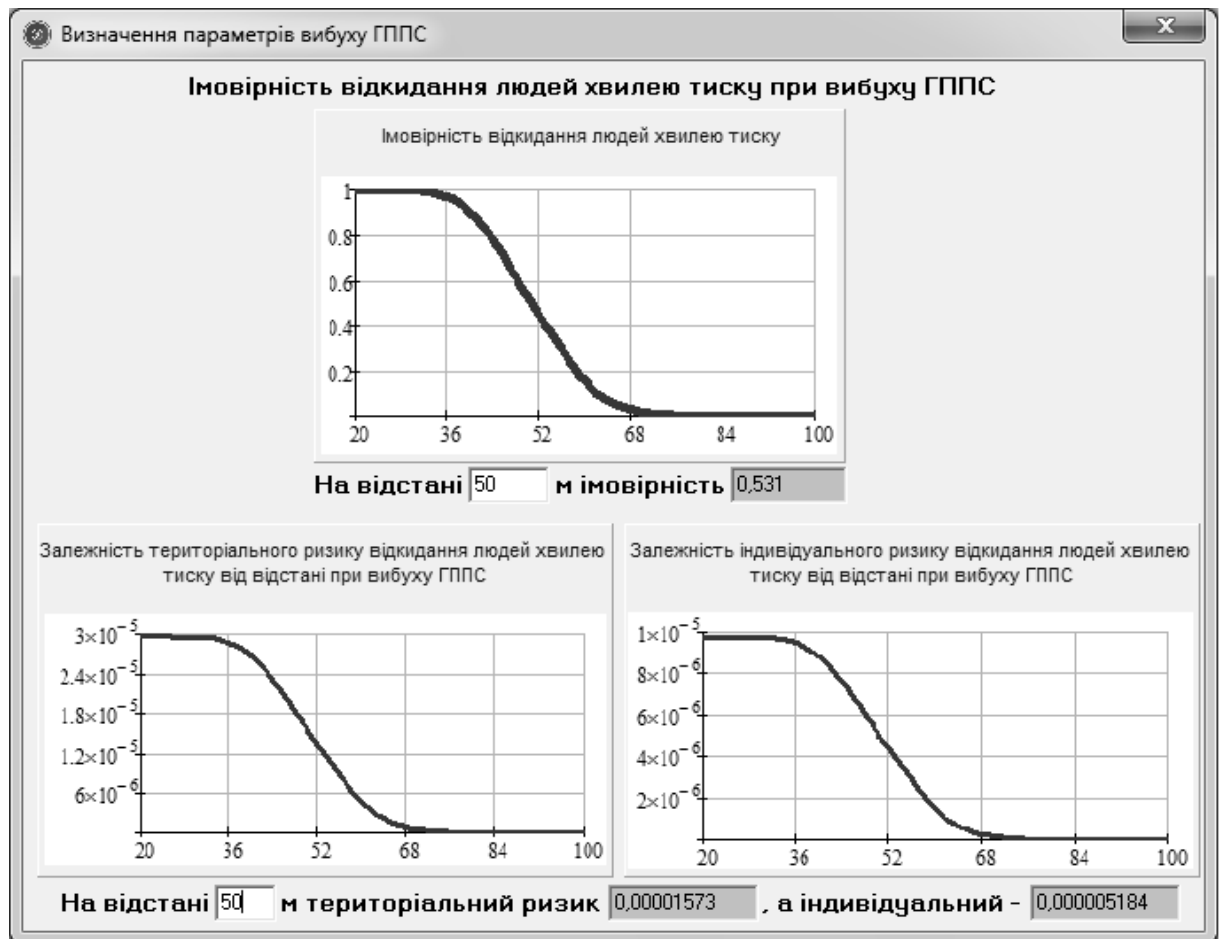


Рис. 4.16 Імовірність відкидання людей хвилею тиску при вибуху ГППС

*Інтенсивність теплового випромінювання при виникненні «вогняної кулі»*

Визначаємо ефективний діаметр «вогняної кулі» ( $D$ , м) та час її існування ( $t_s$ , с):

$$D = 5.33 \cdot M_g^{0.303}$$

$$t_s = 0.92 \cdot M_g^{0.303}$$

Величину висоти центру «вогняної кулі» ( $H$ , м) допускається приймати:

$$H = \frac{D}{2}$$

Кутовий коефіцієнт випромінювання на відстані  $r$  визначається як:

$$F_q(r) = \frac{\frac{H}{D} + 0.5}{4 \left( \left( \frac{H}{D} + 0.5 \right)^2 + \left( \frac{r}{D} \right)^2 \right)^{1.5}}$$

Коефіцієнт пропускання атмосфери  $\tau$  у випадку відсутності експериментальних даних допускається приймати рівним:

$$\tau(r) = e^{-7.0 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D}{2} \right)}$$

Визначаємо інтенсивність теплового випромінювання (середньо-поверхнева щільність теплового випромінювання полум'я ( $E_f$ ) приймається рівною 450 кВт/м<sup>2</sup>):

$$Q(r) = E_f \cdot F_q(r) \cdot \tau(r)$$

Визначаємо поріг болю  $\omega$ , с:

$$\omega(r) = \left( \frac{35}{Q(r)} \right)^{1.33}$$

Графіки залежностей інтенсивності теплового опромінення при виникненні «вогняної кулі» та залежності порогу болю від відстані зображені на рисунку 4.17.

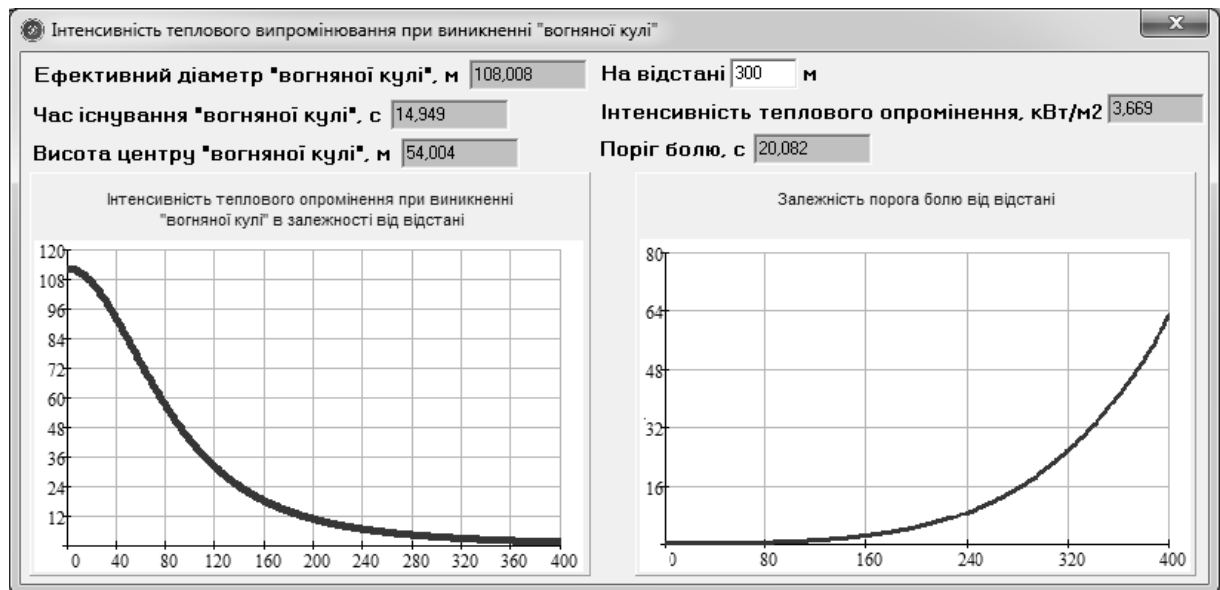


Рис. 4.17 Інтенсивність теплового випромінювання при виникненні «вогняної кулі»

Отже, безпечна відстань від місця розташування людини до зони, де інтенсивність теплового випромінювання не перевищує  $4\text{кВт/м}^2$ , становить 300 м.

*Умовна імовірність ураження людини тепловим випромінюванням*

Визначаємо ефективний час експозиції  $t$ , с:

$$t(r) = t_0 + \frac{300}{u},$$

де,  $t_0$  – характерний час виявлення пожежі (допускається приймати 5 с);

300 – відстань від місця розташування людини до зони, де інтенсивність теплового випромінювання не перевищує  $4\text{кВт/м}^2$ ;

$u$  – швидкість руху людини, м/с (допускається приймати 5 м/с).

Розраховуємо величину «пробіт-функції»:

$$\text{Pr}(r) = -14.9 + 2.56 \cdot \ln(t(r) \cdot (Q(r))^{1.33})$$

Імовірність виникнення «вогняної кулі»:

$$P_{por}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\text{Pr}(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Обчислюємо територіальний та індивідуальний ризики:

$$R_{tvk}(r) = P_{por}(r) \cdot P_{ck} \cdot P_{vk}$$

$$R_{ivk}(r) = R_{tvk}(r) \cdot P_n,$$

де  $P_{vk} = 0.704$  – імовірність виникнення «вогняної кулі».

Графіки залежностей імовірності виникнення «вогняної кулі» від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.18.

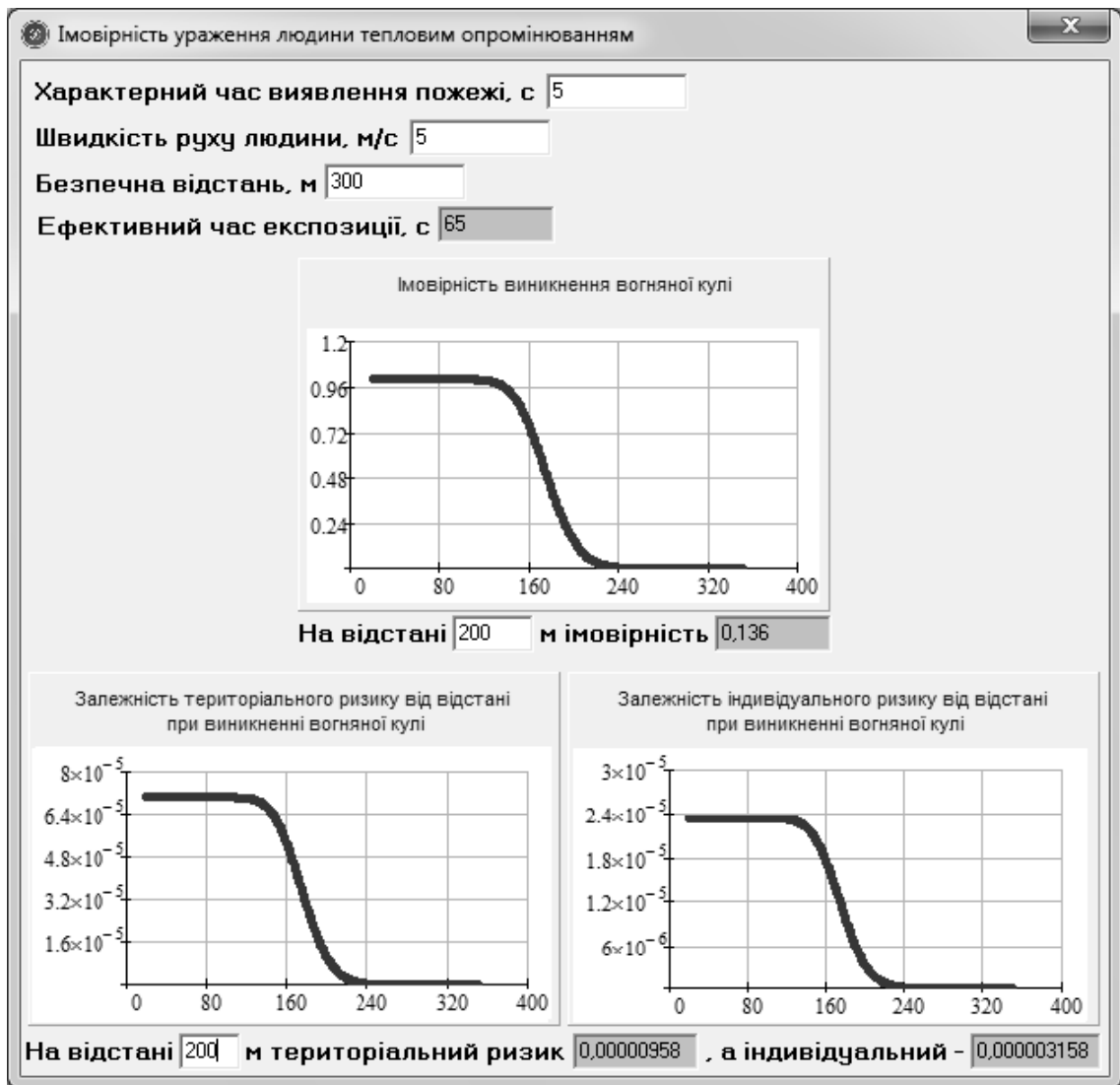


Рис. 4.18 Імовірність ураження людини тепловим випромінюванням

### Виникнення опіку

Опік першого ступеню:

$$Pr_{t_1}(r) = -39.83 + 3.02 \cdot \ln\left(\left(1000 \cdot Q(r)\right)^{\frac{4}{3}} \cdot ts\right)$$

$$Pport_1(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_{t_1}(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Опік другого ступеню:

$$Pr_{t_2}(r) = -43.14 + 3.02 \cdot \ln\left(\left(1000 \cdot Q(r)\right)^{\frac{4}{3}} \cdot ts\right)$$

$$Pport_2(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_{t_2}(r)-5} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Опік третього ступеню:

$$Prt_3(r) = -37.23 + 2.56 \cdot \ln\left(\left(1000 \cdot Q(r)\right)^{\frac{4}{3}} \cdot ts\right)$$

$$Pport_3(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Prt_3(r)-5 \cdot \left(\frac{-r^2}{2}\right)} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt$$

Графіки залежностей імовірності ураження людини при виникненні опіків першого, другого та третього ступенів від відстані, а також територіального та індивідуального ризиків зображені на рисунку 4.19.

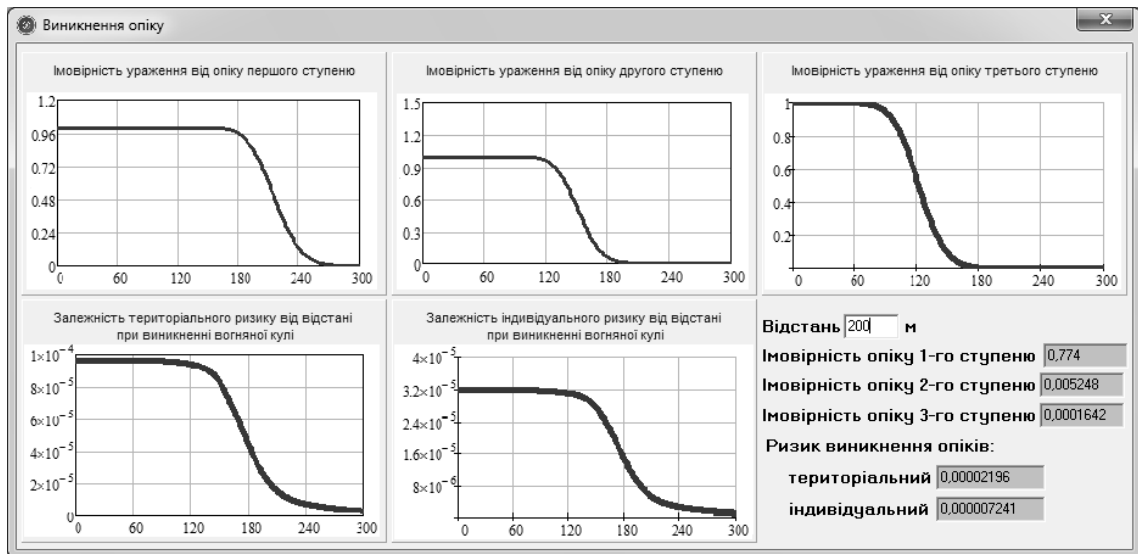


Рис. 4.19 Імовірність ураження людини від опіків

*Розрахунок соціального ризику виникненні аварійних ситуацій на АГЗС*

$Q_i$  – статистична імовірність розвитку аварії за  $i$ -ю гілкою дерева відмов;  $n$  – число гілок дерева відмов.

Імовірність виникнення аварійної ситуації з урахуванням усіх можливих сценаріїв визначається як:  $S = \sum_{i=0}^n (Pck \cdot Q_i)$ .

Імовірність ураження людини на певній відстані (в  $j$ -й зоні) в результаті реалізації  $i$ -го сценарію:

$$Q_{ij}(r) = 1 - (1 - Ppor_2(r) \cdot Ppr) \cdot (1 - Ppor(r) \cdot Pvk).$$

Число летальних наслідків в результаті реалізації  $i$ -го сценарію:

$$N_1(r) = Q_{ij}(r) \cdot 10$$

Соціальний ризик на відстані  $r$  визначається як:

$$S(r) = S \cdot N_1(r)$$

Графіки залежностей імовірності ураження людини та соціального ризику від відстані зображені на рисунку 4.20.

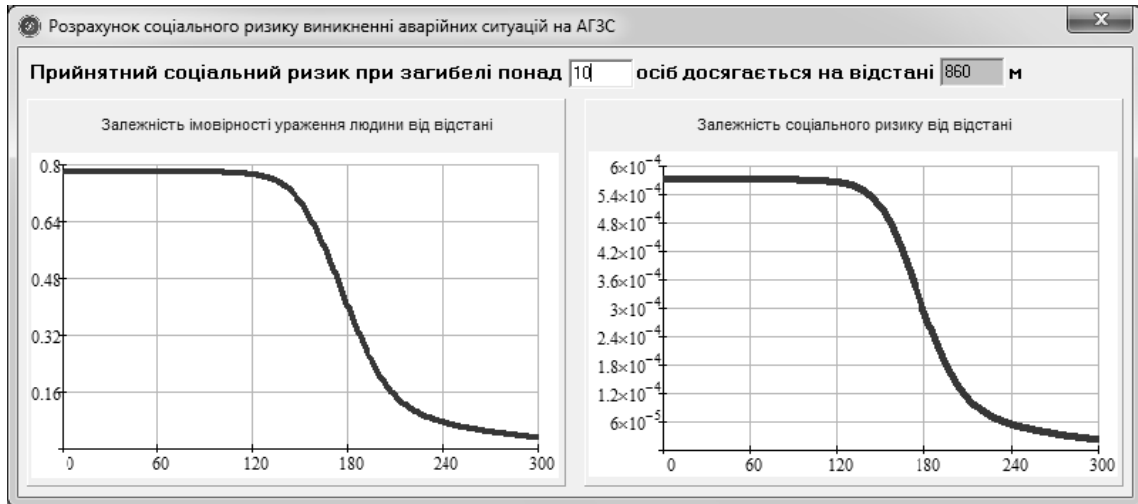


Рис. 4.20 Розрахунок соціального ризику виникнення аварійних ситуацій на АГЗС

Результати розрахунків показали, що прийнятний індивідуальний ризик ( $10^{-8}$ ) перебуває за межами 700 м, а соціальний ризик ( $10^{-7}$ ) за межами 850м.

### 4.3 Аналіз експериментальних результатів роботи інформаційної системи

Техногенні аварії нерозривно пов'язані в кількісному відношенні зі збитком, а в якісному – з НС техногенного, соціального і екологічного характеру на деякій території. Під збитком розуміються фактичні або можливі соціальні і економічні втрати в результаті негативної зміни стану об'єктів, що проявився в порушенні їх цілісності або погіршенні інших властивостей внаслідок деяких подій, явищ, дій, а також погіршення середовища, що оточує людину.

Поняття «наслідки аварії» носить якісний, узагальнений неекономічний характер, тоді як поняття збитку – є кількісна, оцінна, економічна величина, що представляється у вартісному вираженні.

Складність розрахунку збитку вимагає урахування специфіки вирішуваних з його допомогою завдань. Найчастіше вирішуються два завдання:

- обґрунтування здійснюваних заходів захисту;
- обґрунтування розмірів відшкодовуваного збитку.

Ризик обумовлений можливістю спричинення збитку в результаті реалізації загрози і проявляється, в тому числі, у виникненні ТА. При відомих частоті подій і збитку ризик від ТА оцінюється математичним очікуванням збитку за інтервал часу  $\Delta t$ :

$$M[W, t] = a_{TA}(t)\bar{W} = \sum_{j=1}^m a_{TA_j}(t)\bar{W}_j, \quad (4.1)$$

де:  $\bar{W} = \int_0^{\infty} wf(w)dw$  – середній збиток від ТА;  $\bar{W}_j = \int_{W_{TA_{j-1}}}^{W_{TA_j}} wf(w)dw$  – середній

збиток від ТА  $j$ -го класу за ступенем тяжкості;  $a_{TA}(\Delta t) = \lambda_{TA} \Delta t$  – математичне очікування числа ТА за інтервал часу  $\Delta t$ . Середній збиток від ТА можна встановити за статистичними даними.

Аналіз (4.1) показує, що ризик оцінюється за показниками: небезпеки, загрози та уразливості середовища при аваріях і можливих її наслідках.

Оцінка ризику на деякій території зазвичай включає розрахунки можливого числа загиблих та потерпілих людей і економічних втрат, які можуть бути викликані небезпечними явищами. Вона здійснюється на основі аналізу небезпеки території, загроз для людей і об'єктів, їх уразливості і можливого збитку.

Управління ризиками у рамках концепції прийнятного ризику здійснюється шляхом нормування з урахуванням економічних і соціальних чинників, рівнів прийнятного і знехтуваного ризиків порівняння фактичних

ризиків зі встановленими рівнями і прийняття рішення про проведення тих або інших заходів захисту, залежно від результату порівняння.

Соціально-економічний розвиток країни і поетапна реалізація заходів захисту підвищує безпеку життєдіяльності людини. Це дозволяє призначати жорсткіші нормативи безпеки, тобто нижчі рівні прийняттого ризику. Раціональна стратегія підвищення безпеки в країні на основі концепції прийняттого ризику повинна полягати в зниженні індивідуальних ризиків для життєдіяльності від певних причин за рахунок першочергового здійснення заходів захисту в найбільш небезпечних регіонах.

В залежності від можливого збитку, для одних компонентів АГЗС здійснюється пасивне управління ризиком на основі страхування, а для інших – активне управління ризиком на основі регулювання частоти процедур відновлення матеріальних ресурсів і надійності персоналу. В теорії і практиці оцінки ризику найбільш відчутна проблема «людського фактора»: імовірність відмови людини може бути досить точно визначена тільки для конкретної людини, соціальних умов і короткого періоду часу, а узагальнення даних на різних людей, соціальні умови і великі періоди часу спричиняють зростання невизначеності результату. Тому одним з головних принципів організації робіт зі зниження ризику є закріплення в нормативній документації й у правилах безпеки вимог з періодичності ремонтів і замін устаткування, конструкцій, їхніх елементів і матеріалів, для визначення якої використовується нормований показник надійності, і проведення роботи з забезпечення надійності персоналу АГЗС у трьох напрямках:

- відновлення знань (забезпечується якість виконання вимог технології – надійність технології);

- підтримка працездатності (забезпечується безпомилковість роботи персоналу – надійність персоналу);

- формування мотивації до безпечної продуктивної праці (забезпечується своєчасність і точність експлуатації – надійність експлуатації).



Заключним етапом аналізу ризику є розробка рекомендацій з його зменшення, які представляють обґрунтовані заходи для зменшення ризику, засновані на результатах оцінок ризику. Підвищення рівня безпеки (зниження аварійності) АГЗС у загальному випадку може відбуватися у трьох напрямках:

- зниження імовірності виникнення аварії; її рівень залежить від надійності устаткування, ступеня контрольованості технологічного процесу і ефективності управління ним, кваліфікації і професіоналізму працівників;

- зменшення сили аварійної події (розмірів і напрямків поширення впливу енергії) у навколишньому просторі;

- зменшення масштабів ураження.

Для зменшення ризику можуть бути здійснені заходи технічного і організаційного характеру. У виборі типу заходу вирішальне значення має загальна оцінка дієвості і надійності заходів, що здійснюють вплив на ризик, а також розмір витрат на їхню реалізацію.

На стадії експлуатації АГЗС організаційні заходи можуть компенсувати обмежені можливості для реалізації масштабних технічних заходів для зменшення ризику.

При розробці заходів для зменшення ризику пропонується враховувати, що внаслідок можливої обмеженості ресурсів у першу чергу повинні розроблятися найпростіші і пов'язані з найменшими витратами рекомендації, а також заходи на перспективу.

Витрати, спрямовані на зниження імовірності техногенної аварії, пов'язані з підвищенням надійності роботи первинних елементів технологічної схеми АГЗС, з впровадженням у технологічні процеси схем блокування окремих «ланцюжків» поширення аварійних передумов, зі зниженням їх складової в імовірності результуючої аварії.

Визначення недостатньо надійних елементів АГЗС і місць установки схем, що блокують передумови аварій, пропонується здійснювати на основі запропонованого «дерева відмов», яке передбачає сценарії розвитку ситуацій,

у результаті яких можливе виникнення несприятливої події та дозволяє визначити значення імовірності цієї події.

Витрати, що зменшують силу аварійної події, можуть здійснюватися як для пом'якшення наслідків техногенних аварій, так і для зменшення зони поширення вражаючих факторів, усунення каскадних ефектів у їхньому поширенні. Для АГЗС це можуть бути вкладення в підвищення пожежостійкості споруд і обладнання, у збільшення міцності корпусів трубопровідних систем і ємностей із ЗВГ, у спорудженні бар'єрів на шляху поширення ударної хвилі і т.п. Ефективність таких заходів істотно залежить від вірогідності прогнозу сценарію розвитку фізичних ефектів, обумовлених виникненням несприятливої події, їхнього впливу на навколишнє середовище. Слід зазначити, що такі витрати деякою мірою спрямовані на зменшення зони поширення вражаючих факторів, викликаних несприятливою подією, у навколишньому просторі, а отже, і масштабів ураження.

Однак у ризик-аналізі часто масштаби ураження визначають не за площею чи обсягом поширення вражаючих факторів, а за кількістю людей, що знаходяться в зоні їхнього впливу, чиї життя і здоров'я перебувають під реальною загрозою. Унаслідок цього, у ризик-аналізі звичайно виділяється спеціальний вид витрат на зменшення масштабів ураження, спрямованих на підвищення підготовленості персоналу і населення до захисних дій при аваріях і катастрофах.

Тобто для забезпечення безпеки АГЗС першочерговими мають бути заходи щодо попередження аварій. Вибір планованих для впровадження заходів безпеки має наступні пріоритети:

1) заходи зі зменшення імовірності виникнення аварійної ситуації, що включають:

– заходи щодо зменшення імовірності виникнення інциденту;

– заходи зменшення імовірності переростання інциденту в аварійну ситуацію;

2) заходи зменшення тяжкості наслідків аварії, що, у свою чергу, мають наступні пріоритети:

– заходи, що передбачаються при проектуванні АГЗС (наприклад, вибір несучих конструкцій, запірної арматури);

– заходи, що відносяться до систем протиаварійного захисту і контролю (наприклад, застосування газоаналізаторів);

– заходи, що стосуються готовності до локалізації і ліквідації наслідків аварій.

Для обґрунтування й оцінки ефективності пропонованих заходів зі зменшення ризику рекомендується дотримуватися двох альтернативних цілей їхньої оптимізації:

1) забезпечити максимальне зниження ризику експлуатації АГЗС при заданих засобах;

2) забезпечити зниження ризику до прийняттого рівня при мінімальних витратах.

Для визначення пріоритетності виконання заходів для зменшення ризику в умовах заданих засобів чи обмеженості ресурсів необхідно:

– визначити сукупність заходів, що можуть бути реалізовані при заданих обсягах фінансування;

– ранжирувати ці заходи для показника «ефективність – витрати»;

– обґрунтувати й оцінити ефективність пропонованих заходів.

#### **4.4 Висновки до розділу 4**

Розроблено інформаційну систему за інформаційною технологією, що реалізує представлені в роботі моделі та методи. Створена інформаційна система використовувалась для реалізації експериментальних досліджень. Наведено опис модулів і функціональну схему інформаційної технології підвищення надійності інформаційної системи АГЗС. Створена ІС

підвищення надійності АГЗС призначена для вирішення завдань управління ризиком і орієнтована на вирішення завдань інформаційної підтримки процесів управління ризиками при експлуатації АГЗС.

Проведено експериментальне дослідження роботи інформаційної системи підвищення надійності АГЗС з метою оцінки індивідуального, територіального та соціального ризиків та наслідків аварій на АГЗС. Результати розрахунків при наведеному в цьому розділі наборі вхідних даних показали, що прийнятний індивідуальний ризик ( $10^{-8}$ ) перебуває за межами 700 м, а соціальний ризик ( $10^{-7}$ ) – за межами 850 м. Результати виконаних розрахунків і оцінок є основою для підготовки рішень з управління ризиком.

Розроблено рекомендації з використання запропонованих методів, які представляють собою обґрунтовані заходи, засновані на результатах оцінок ризику. Пропонується підвищення рівня безпеки АГЗС за рахунок зниження імовірності виникнення аварії, зменшення сили аварійної події у навколишньому просторі та зменшення масштабів ураження. Для обґрунтування й оцінки ефективності запропонованих заходів зі зменшення ризику рекомендується дотримуватися двох альтернативних цілей їхньої оптимізації: забезпечення максимального зниження ризику експлуатації АГЗС при заданих засобах та забезпечення зниження ризику до прийнятного рівня при мінімальних витратах.

Результати, подані в розділі, автор опублікував у працях [1, 2, 16].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені результати, які відповідно до поставленої мети є рішенням актуальної науково-практичної задачі.

Одержано такі нові теоретичні та практичні результати:

1. Проведено аналіз моделі управління ризиком виникнення аварій на АГЗС. Проведений аналіз показує, що надзвичайні ситуації техногенного характеру здатні в будь-який час нанести серйозну втрату у всіх сферах людської діяльності. Обґрунтовано високий рівень небезпечності АГЗС та наведено огляд та класифікацію критичних ситуацій у їх функціонуванні. Розглянуто класифікацію рівнів безпеки та кількісні показники ризику аварії, які є основою моделі управління ризиком функціонування АГЗС.

Проведено аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Проведений аналіз літератури показав, що при великому різноманітті робіт у досліджуваній предметній області недостатньо проробленими залишаються питання розпізнавання ситуацій і синтезу варіанта рішення з протидії виникненню техногенних аварій на АГЗС.

Аналіз діяльності осіб, що приймають рішення при оцінці ризиків виникнення техногенних аварій показав, що при зниженні часу, затрачуваного на роботу пов'язану з пошуком, обробкою й відображенням необхідної інформації, може бути підвищена оперативність рішення завдань оцінки аварійної ситуації.

2. Удосконалено метод оцінки імовірності виникнення аварії на АГЗС, із застосуванням «дерева відмов» для аналізу територіального, індивідуального і соціального ризиків. При оцінці ризику аварії методом «дерева відмов» виявлені комбінації відмов устаткування, помилок персоналу і зовнішніх впливів, що приводять до аварійної ситуації. Виконано моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на АГЗС на основі аналізу умов їх виникнення і розвитку та побудовано «дерево відмов» функціонування АГЗС. Отримані імовірності

реалізації сценаріїв аварії стали основою для розрахунку показників територіального, індивідуального і соціального ризиків.

3. Удосконалено модель функціонування автомобільної газозаправної станції на основі використання сценаріїв аварійних ситуацій, що дозволяє оцінити імовірність відмови інформаційної системи та підвищити її надійність.

4. Отримав подальшого розвитку метод оцінки соціального ризику із застосуванням нейронних мереж. Результати роботи інформаційної системи були порівняні з результатами навчання нейронної мережі, що визначає значення відстані, на якій досягається прийнятний рівень соціального ризику, із встановленням відносної похибки розрахунків (1,35 %). Це дозволило зробити висновок про те, що нейронна мережа, навчена за даною технологією, дає результат, близький до результату роботи інформаційної системи на основі представленого методу.

5. Вперше запропоновано метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій, який на відміну від існуючих, дозволяє виконувати обчислення на основі багатозначної логіки для обробки знань, що містять елементи невизначеності. Реалізація даного методу припускає рішення як розрахункових, так і логіко-аналітичних завдань, що обумовлено застосуванням методів штучного інтелекту.

6. Розроблено інформаційну технологію, що реалізує представлені в роботі моделі та методи. Інформаційна система, створена за даною інформаційною технологією, використовувалась для реалізації експериментальних досліджень. Створено ІС підвищення надійності АГЗС, яка призначена для вирішення завдань управління ризиком і орієнтована на вирішення завдань інформаційної підтримки процесів управління ризиками при експлуатації АГЗС.

Проведено експериментальне дослідження роботи інформаційної системи підвищення надійності АГЗС з метою оцінки індивідуального, територіального та соціального ризиків та наслідків аварій на АГЗС. Результати розрахунків при наведеному в четвертому розділі наборі вхідних даних показали, що

прийнятний індивідуальний ризик ( $10^{-8}$ ) перебуває за межами 700 м, а соціальний ризик ( $10^{-7}$ ) – за межами 850 м. Результати виконаних розрахунків і оцінок є основою для підготовки рішень з управління ризиком.

7. Розроблено рекомендації з використання запропонованих методів, які представляють собою обґрунтовані заходи, засновані на результатах оцінок ризику. Пропонується підвищення рівня безпеки АГЗС за рахунок зниження імовірності виникнення аварії, зменшення сили аварійної події у навколишньому просторі та зменшення масштабів ураження.

Для обґрунтування й оцінки ефективності пропонованих заходів зі зменшення ризику рекомендується дотримуватися двох альтернативних цілей їхньої оптимізації: забезпечення максимального зниження ризику експлуатації АГЗС при заданих засобах та забезпечення зниження ризику до прийняттого рівня при мінімальних витратах.

8. Перспективними шляхами подальших досліджень у зазначеному напрямку може бути широке коло питань щодо розробки нових та удосконалення існуючих методик підвищення надійності об'єктів техногенної небезпеки на основі використання інформаційних технологій.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Практичне значення результатів роботи підтверджено впровадженням і використанням в навчальному процесі.

Розроблені моделі, методи та інформаційні технології підвищення надійності АГЗС апробовані, застосовані і впроваджені при розробці інформаційних систем у ТОВ «Нафтогазбудінформатика» та у конструкторському бюро інформаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського для вирішення задачі зниження ризику виникнення техногенних аварій, що підтверджено відповідними актами впровадження (додаток В).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Завгородня Г.А. Інформаційна система підвищення надійності потенційно небезпечних об'єктів. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення*: збірник тез доповідей міжнародної наукової інтернет-конференції: випуск 41 (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 р.). Тернопіль, 2019. С. 23-24.
2. Завгородня Г.А. Напрямки підвищення рівня безпеки потенційно небезпечних об'єктів. *Вересневі наукові читання*: збірник наукових матеріалів XXXIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Вінниця, 16 вересня 2019 року.). Вінниця, 2019. Ч.2, С. 9-13.
3. Отрох С.І., Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Грищенко О.О. Аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2018. №3 (51). С. 59-69.
4. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Аналіз рівня небезпеки у концепції прийняттого ризику. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення*: тези доповідей I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Житомир, 19-20 жовтня 2018 р.). Житомир: Вид. О.О. Євенок, 2018. С.43-44.
5. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Методи аналізу відмов та ризику аварій. *Євроінтеграція в науці та інноваціях*: тези доповідей LXI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернівці, 15-16 жовтня 2018 р.). Київ: Науково-видавничий центр «Лабораторія думки», 2018. С.18-21.
6. Zavgorodnii V., Zavgorodnya A., Maiko V., Malikov V., Zhuk D. Methods and models for assessment of reliability of structural-complex systems. *World Science*. Warsaw: RS Global Sp. z O.O., 2018. №11 (39). PP. 5-14. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/30112018/6227
7. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Модель управління ризиком об'єктів підвищеної небезпеки. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2018.



№18. С. 52-55. DOI: 10.25313/2520-2057-2018-18-4261.

8. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Автоматизоване моделювання етапів загального логіко-імовірнісного методу. *Механізми та стратегії розвитку господарюючих суб'єктів в умовах інтеграційних процесів*: матеріали науково-практичної INTERNET-конференції студентів та молодих вчених з міжнародною участю, Wyższa Szkoła Społeczno-Gospodarcza w Przeworsku. (м. Харків – Пшеворськ, 19 лютого 2019 р.). Przeworsk: WSSG, 2019. С. 115-117.

9. Завгородня Г.А., Корнага Я.І., Мухін В.Є., Завгородній В.В., Базака Ю.А. Моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на автомобільних газозаправних станціях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69), №5, Частина 1. С. 92-97. DOI: 10.32838/2663-5941/2019.5-1/14.

10. Zavgorodnya A., Zavgorodnii V., Plisenko V., Provatorov N., Kudientsov P. Methods modeling systems for the improvement of their reliability. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2019. № 9(39), Vol.1. PP. 3-12. DOI: 10.31435/rsglobal\_wos/30092019/6683

11. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Метод кількісної оцінки ризику технічних систем. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології»*. Київ: ДУІТ, 2018. Вип. 2 (32). С. 87-95. DOI: 10.32703/2617-9040-2018-32-2-87-95

12. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2018. Вип. 4 (111). С. 43–48. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.4.43-48.

13. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Аналіз методів виробки рішень при виникненні техногенних аварій у системах управління реального часу. *Вісник університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*. Київ, 2018. №2 (21/2). С.72-76.

14. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Методи оцінки надійності людино-

машинної системи. *Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та праві*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 18-19 квітня 2019 р.). Київ: КНУКіМ, 2019. Ч1. С.30-31.

15. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Шляхи підвищення надійності складних технічних систем в умовах експлуатації. *Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку*: збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 16-17 травня 2019 р.). Київ: ДУІТ, 2019. С. 156-158.

16. Отрох С.І., Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Аналіз взаємозв'язку збитку з ризиком при виникненні техногенних аварій в концепції прийнятного ризику. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2018. №2 (59). С. 117-123. DOI: 10.31673/2412-4338-2018-0-2-117-123.

17. Дикань С.А., Зима О.Є. Безпека в галузі та надзвичайних ситуаціях. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. 273 с.

18. Минав Ю.Н., Филимонова О.Ю., Бенамеур Л. Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе. Москва: Горячая линия Телеком, 2003. 205 с.

19. Ямалов И.У. Автоматизация оперативных процессов управления ликвидацией чрезвычайных ситуаций. *Автоматизация и современные технологии*. 2007. №5. С.8–11.

20. Berman, A.F., Nickolaychuk, O.A., Yurin, A.Y. Intelligent Planner for Control of Failures Analysis of Unique Mechanical Systems. *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37, Issue 10. P. 7101–7107.

21. Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерных знаний / Л.Р. Черняховская и др. Уфа, 2010. 128 с.

22. Русинов Т.А., Рудакова И.В. Куркина В.В. Обнаружение нештатных ситуаций при оперативном управлении химико-технологическими процессами. *Автоматизация и современные технологии*. 2007. №6. С.40–45.

23. Хентов В.Я., Шачнева Е.Ю., Семченко В.В. Процессы комплексообразования природного и техногенного происхождения: монография. Москва, 2017. 272 с.

24. Ефремов С.В. Управление техносферной безопасностью: краткий курс. СПб: Изд-во СПбПУ, 2013. 46 с.

25. Куликова Е.Е. Управление рисками: инновационный аспект. Москва: Бератор-Паблишинг, 2008. 112 с.

26. Офіційний сайт ВРУ: електронний ресурс. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0969-18#n14>

27. Острейковский В.А., Шевченко Е.Н. Анализ моделей распределения характеристик техногенного риска по статистическим данным аварий и катастроф сложных критически важных объектов. *Надежность и качество сложных систем*. 2015. №2. С. 3-12.

28. Алгоритмы. Решения. Математическое моделирование. Управление рисками и безопасностью / Под ред. С.В. Емельянова. М.: Ленанд, 2014. 102 с.

29. Чура Н.Н., Девисилов В.А. Техногенный риск: учебное пособие. Москва: КноРус, 2017. 280 с.

30. Офіційний сайт ДСНС: електронний ресурс. URL: <https://www.dsns.gov.ua/>

31. Рева Г.В., Врублевский В.К., Ксьонзенко В.П., Маринич І.В. Український соціум: загрози екстремальних ситуацій: монографія. Київ: Інформаційно-видавничий центр «Інтелект», 2003. 432 с.

32. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. / Под редакцией В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. Москва, 2001. Кн. 5. 415 с.

33. Лесенко Г.Г. Визначення пріоритетних заходів в системі профілактики ризиків смертельних випадків на виробництві. *Актуальні проблеми цивільного захисту*: VI Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, 27-28 жовтня 2004 р. Київ, 2004. С. 43–44.

34. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. / Под ред. В. А. Котляревского. Москва, 2003. Кн. 6. 406 с.

35. Будылина Е. А., Гарькина И. А., Данилов А. М., Пылайкин С. А. Управление безопасностью сложных систем. *Молодой ученый*. 2013. №11. С. 78-80.
36. Портнов В.А., Махутов Н.А., Зеленев И.Б. Энергоинформационная основа анализа риска при создании и использовании технических систем. *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*. 2003. Вып. 2. С. 16–27.
37. Гранкин Б.К., Козлов В.В., Лысенко И.В., Петров Г.Д. Метод контроля технического состояния уникальных механических объектов при длительной их эксплуатации. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2008. №3. С.20–23.
38. Мастрюков Б. С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Москва: ИЦ «Академия», 2003. 336 с.
39. Чернецова Е.А. Метод поддержки принятия решений автоматизированной системой экологического мониторинга. *Вестник компьютерных информационных технологий*. 2008. №4. С. 19–23.
40. Прапгишвили И.В., Потоцкий В.А., Гинсберг К.С., Смолянинов В.В. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям. *Проблемы управления*. 2004. № 4. С. 2-15.
41. Протокол з стратегічної екологічної оцінки до Конвенції з оцінки впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті: ЕСЕ/МР.ЕІА / 2003 / 3 / Нью-Йорк. Женева: вид. ООН, 2003. 48 с.
42. Коробко В.И. Промышленная безопасность. Москва: «Академия», 2012. 208с.
43. Аверченков В.И., Рытов М.Ю., Гайнулин Т.Р. Математическое моделирование процесса выбора состава технических средств систем защиты. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2009. №9. С.45–49.
44. Солод С.А., Хабаху С.Н. Оценка и прогнозирование техногенного риска. *Чрезвычайные ситуации: промышленная и техногенная безопасность*. 2015. №2-3 (22-23). С. 63-67.
45. Лифар В.О. Інформаційне забезпечення системи управління техногенним ризиком. *Наукові праці Чорноморського державного університету*

*ім. Петра Могили. Сер. Комп'ютерні технології. 2016. Т. 283. Вип. 271. С. 94–115.*

46. Шубин В.С. и др. Программное обеспечение анализа надежности оборудования химических производств. *Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. №4. С. 40–44.*

47. Нозик А.А. Методы проектного расчета надежности автоматизированных систем управления технологическими процессами. *«Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и системотехника, теория и вопросы применения»*: тр. II междунар. науч.-практ. конф. Новочеркасск: НПИ, 2002. Часть I. С. 33–45.

48. Нозик А.А. Технология автоматизированного структурно-логического моделирования в проектных расчетах надежности систем. *«Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах»*: тр. II междунар. научн. школы МА БР. СПб.: Издательство «Бизнес-Пресса», 2002. С. 337–344.

49. Грановский Э. А., Лыфарь В. А. Анализ риска возникновения аварий, пожаров и взрывов. *Научно-технические проблемы и решения*: бюлл. пожарн. безопасн. 2001. № 2. С. 13–15.

50. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. Техногенный риск. Анализ и оценка. Москва: Академкнига, 2004. 11 с.

51. Телегина М.В., Янников И.М., Куделькин В.А., Ушаков И.С. Модели и методы оценки безопасности критически важных и потенциально опасных объектов. *Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т.5, №1. С. 118–121.*

52. Грановский Э. А., Лыфарь В. А. Моделирование промышленных аварий. Последствия и риск. *Научно-технические проблемы и решения*: бюлл. пожарн. безопасн. 2001. № 1. С. 14–16.

53. Геловани В.А., Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. Москва: Эдиториал УРСС, 2001.

54. Тихомиров Н. П., Потравный И. М., Тихомирова Т. М. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. Москва: Юнити, 2003. 350 с.

55. Бурков В.Н., Титаренко Б.П. Разработка механизмов управления риском чрезвычайных ситуаций. *Вестник МГСУ*. 2017. Т.12. Вып. 5 (104). С. 559-563.

56. Тыренин А.Н., Сурина А.А. Моделирование риска в многомерных стохастических системах. *Вестник Томского государственного университета*. 2017. № 39. С. 65-72.

57. Буянов В.П., Кирсанов К.А., Михайлов Л.М. Рискология (управление рисками): 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Экзамен, 2003. 384 с.

58. Liu H. C., Liu L., Liu N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert systems with applications*. 2013. Т. 40. №. 2. С. 828–838.

59. Гражданкин А.И., Белов П.Г. Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов. *Безопасность труда в промышленности*. 2000. №11. С. 6–10.

60. Про затвердження Методики визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки: наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 04.12.2002 р. № 637.

61. Берман А.Ф., Васильев С.Н. Условия и источники техногенного риска. *Проблемы человеческого риска*. 2007. №1 С. 45–50.

62. Tinga T. Introduction: The Basics of Failure. *Principles of Loads and Failure Mechanisms*. Springer. 2013. С. 3–10.

63. Han X., Zhang J. A combined analysis method of FMEA and FTA for improving the safety analysis quality of safety-critical software. *Granular computing (GrC)*. IEEE, 2013. С. 353–356.

64. Матвеев Б.А. Система управления риском. *Вестник ЮУрГУ*. 2007. №5. С. 70–75.

65. Малинецкий Г.Г. Сценарии, стратегические риски, информационные

технологии. *Информационные технологии и вычислительные системы*. №4. 2002. С. 62–70.

66. Levitin G. et al. Reliability of non-repairable phased-mission systems with propagated failures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2013. Т. 119. С. 218–228.

67. Лисанов М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска. *Безопасность труда в промышленности*. 2004. №5. С. 11–14.

68. Антонова Г.М., Цвиркун А.Д. Оптимизационно-имитационное моделирование для решения проблем оптимизации современных сложных производственных систем. *Проблемы управления*. 2005. № 5. С. 19–27.

69. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность): учебник. Изд. 4-е, испр. и доп. Москва: Юрайт, 2012. 682 с.

70. Берман А.Ф., Васильев С.Н. Технология обеспечения приемлемого риска аварий механических систем. *Проблемы человеческого риска*. 2006. №1. С. 61–69.

71. Грибова В.В., Клещев А.С., Шалфеева Е.А. Управление программными средствами в интеллектуальных системах. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2010. №6. С. 122–142.

72. Кочкаров А.А., Малинецкий Г.Г. Управление безопасностью и стойкостью сложных систем в условиях внешних воздействий. *Проблемы управления*. 2005. № 5. С. 70–76.

73. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Михайлова П.Г. Модели и методы решения задач оперативного управления безопасностью непрерывных химико-технологических систем. Управление в условиях неопределенности. *Control sciences*. 2005. №6. С. 50–55.

74. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. Vol.1, №1.

75. Еременко, К. И. Интеллектуальные системы принятия решений и управления. Старый Оскол: ТИТ, 2015. 203 с.

76. Головинский П.А., Суровцев И.С. Интеллектуальные информационные системы: теоретические основы и приложения. Воронеж: Воронежский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2015. 203 с.

77. Серов В.В. Практическое применение нечеткой логики для формализации знаний. *Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности*: сб. тр. конф., 1-2 февраля 2018 г. Москва, 2018. С.32-36.

78. Потапов А. С. Искусственный интеллект и универсальное мышление. СПб.: Политехника, 2012. 711 с.

79. Егоров, А.Ф., Савицкая Т.В. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических и нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Москва: Колос, 2010. 526 с.

80. Кофман А., Хил Алуха Х. Введение теории нечетких множеств в управлении предприятиями. Минск: Высшая школа, 1992.

81. Юсупова Н.И., Еникеева К.Р. Интеллектуальная информационная поддержка принятия решений при анализе рисков чрезвычайных ситуаций и управлении ими. Москва: Машиностроение, 2014. 208 с.

82. Sokolov A. Algebraic approach on fuzzy control. *Proc. 14th Triennial world Congress IFAC*. Beijing (China), 2009. P.219–224.

83. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. Vol. 15, № 1. P. 116–132.

84. Бояркина О.О., Шаликова А.А. Ителлектуальные системы поддержки принятия решений. *Современные научные исследования и инновации*. 2016. №12 (68.) С. 193-197.

85. Hovanov N., Yudaeva M., Hovanov K. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge. *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 195, Issue 3. P. 857–863.

86. Бабак О.В., Татаринев А.Э. Об одном подходе к решению задач классификации в условиях неполноты информации. *Кибернетика и системный*



*анализ*. 2005. №6. С. 116–123.

87. Тельнов Ю.Ф. Проектирование систем управления знаниями. *Новости искусственного интеллекта*. 2002. № 4. С. 29–34.

88. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. СПб.:БХВ-Петербург, 2002. 241 с.

89. Парийская Е.Ю. Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем. *Сборник трудов*. СПб.: Институт теоретической астрономии РАН, 1997. С. 91-120.

90. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Москва: Горячая линия Телеком, 2013. 383 с.

91. Гафт М.Г. Принятие решений при многих критериях. Москва: Знание, 1979. 350 с.

92. Mamdani E. H. Rull-based Fuzzy Approach to the Control of Dynamic Processes. *IEEE Trans. on Comput.* 1981. № 12. P. 432–440.

93. Бабынин Н. М., Жихарев В. Я., Илюшко В. М. Применение методов искусственного интеллекта в управлении проектами / под ред. А. Ю. Соколова. Харків: НАУ «ХАІ», 2002. 474 с.

94. Чура Н.Н., Девисилов В.А. Техногенный риск. Издательство: КноРусс. 2011. 280 с.

95. Окороков Р.В., Тимофеева А.А., Капралов В.Д. Эффективность применения интеллектуальных технологий управления современными производственными системами. *Известия высших учебных заведений. Сер.: Экономика, финансы и управление производством*. 2016. №1 (27). с. 109-115.

96. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. Пер. с франц. Москва: Радио и связь, 1982. 432 с.

97. Воскобоев В.Ф. Надежность технических систем и техногенный риск. Москва: Альянс, Путь, 2008. 200 с.

98. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания: учебное пособие. Изд. 2-е. Москва: Вища школа, 1984. 208 с.

99. Литвинский К.О., Никитенко Ю.В. Модель системы управления техногенными рисками на промышленных предприятиях. *Экономика устойчивого развития*. 2014. № 4(20). С. 139–144.

100. Герасимов Б.М., Дивизинюк М.М., Субач И.Ю. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности. Севастополь: МО Украины, НАН Украины, НИЦ ВС Украины «Государственный океанариум», 2004. 318 с.

101. Volodymyr Lyfar The information model of technogenic risk management. *ТЕКА. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: Polish Academy of sciences. Lublin-Lugansk*, 2016. Vol. 12, No 3, P. 6.

102. Искусственный интеллект: современный подход. Изд. 2-ое./ Пер. с англ. Москва: «Вильямс», 2006. 1408 с.

103. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И.Д. Рудинского. Москва: Горячая линия Телеком, 2004. 452 с.

104. Sokolov A. Intelligent control systems of air breathing engines. *Proc. 14th International Symposium on Air breathing Engines (ISABE 99)*. Florence (Italy), 2009. ISABE. P. 99–103.

105. Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов. *Безопасность труда в промышленности*. 2001. №5. С. 8-12.

106. Острейковский В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели: монография. Сургут. гос. ун-т ХМАО Югры. Сургут: ИЦ СурГУ, 2013. 320 с.

107. Варшавский П.Р. Метод рассуждения на основе прецедентов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Сб. тр. Научной сессии МИФИ-2005. В 15т. Москва, 2005. Т. 3. С. 154-155.

108. Остроух, А.В., Николаев А.Б. Интеллектуальные информационные системы и технологии: монография. СПб.: Лань, 2019. 308 с.

109. Информационные технологии и вычислительные системы:

Высокопроизводительные вычислительные системы. Глобальные проекты и решения. Интеллектуальные системы и технологии. Прикладные аспекты информатики. / под ред. С.В. Емельянова. Москва: Ленанд, 2013. 128 с.

110. Искусственный интеллект и принятие решений: Когнитивные исследования. Эволюционные вычисления. Интеллектуальные системы и технологии. Многокритериальный анализ решений. / под ред. С.В. Емельянова. Москва: Ленанд, 2012. 128 с.

111. Scharf H., Mandic N., Mamdani E.H. A self-organizing algorithm for the control of a robot arm. *Int. J. Robotics and Automation*. 1986. Vol.1, №1. P. 33–41.

112. Liu, H. C., Chen, X. Q., Duan, C. Y., & Wang, Y. M. Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*. 2019.

113. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Москва: Мир. 1976. 165 с.

114. Заде. Л.А. Лингвистическая переменная. Москва: Физматгиз, 1972. 152 с.

115. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. Москва: «Вильямс», 2006. 1408 с.

116. Литвинский К.О., Малышев В.А., Никитенко Ю.В. Модель подсистемы поддержки принятия решений в системе управления техногенными рисками на предприятиях топливно-энергетического комплекса. *Экономика устойчивого развития*. 2015. №1(21). С.91-99.

117. Гаврилова Т.А. Логико-лингвистическое управление как введение в управление знаниями. *Новости искусственного интеллекта*. 2002. № 6. С. 36–40.

118. Дадян Э.Г., Зеленков Ю.А. Методы, модели, средства хранения и обработки данных. Москва: Инфра-М, 2016. 168 с.

119. Новиков А.П., Сурхаев М.А., Никишина А.А. Виды обработки и классы моделей знаний в компьютерных системах. *Прикладная информатика*. 2017. Т. 12. №6 (72). С. 101-109.

120. Harvard Business Review: Методы принятия решений. Москва: Альпина Паблишер, 2018. 208 с.

121. Евменов В.П. Интеллектуальные системы управления: превосходство искусственного интеллекта над естественным интеллектом? Москва: КД Либроком, 2017. 304 с.

122. Заде Л.А. Основы нового похода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. *Математика сегодня*. Москва: Знание, 1974. С. 5–49.

123. Лифар В.О. Моделі, методи та інформаційні технології управління техногенним ризиком об'єктів підвищеної небезпеки. *Ольвійський форум 2016: стратегії країн Причорноморського регіону в політичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф.* Миколаїв: вид. ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. Інформаційні технології у розвитку суспільства. С. 24–26.

124. Трахтенгерц Э.А., Степин Ю.П., Андреев Л.Ф. Компьютерные методы поддержки принятия управленческих решений в нефтегазовой промышленности. Москва: СИНТЕГ, 2005. 592 с.

125. Динцис Д.Ю. Совместное использование нечеткологических и дискретных моделей технологических и управленческих систем. *Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика*. 2006. №5. С. 61–64.

126. Емельянов, С.В. Искусственный интеллект и принятие решений: Методы рассуждений и представления знаний. Когнитивные исследования. *Интеллектуальные системы*. Москва: Ленанд, 2014. Вып.3. 120с.

127. Дранишников Л. В., Найверт А. В. Оценка риска возникновения аварии. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2004. № 2. С. 31–41.

128. Кривко, О.Б. Информационные технологии. Москва: СОМИНТЭК. 2011. 179 с.

129. Муравьев И.И., Острейковский В.А., Шевченко Е.Н. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем *Надежность и качество: тр. междунар. симп.* 2015. Т.1. С. 24-27.

130. Ruijters E., Stoelinga M. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-

art in modeling, analysis and tools. *Computer science review*. 2015. Т. 15. С. 29–62.

131. Wu W. et al. Reliability analysis of a k-out-of-n: G repairable system with single vacation. *Applied Mathematical Modelling*. 2014. Т. 38. №. 24. С. 6075–6097.

132. Lu J. M., Wu X. Y. Reliability evaluation of generalized phased-mission systems with repairable components. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. Т. 121. С. 136–145.

133. Xing L., Levitin G. BDD-based reliability evaluation of phased-mission systems with internal/external common-cause failures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2013. Т. 112. С. 145–153.

134. Дранишников Л. В., Найверт А. В., Найверт Л. И. К вопросу управления технической безопасностью объектов повышенной опасности: материалы VI Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників. Київ, 27-28 жовтня 2004 р.

135. Barge W.S., Stewart W.J. Autonomous Solution Methods for Large Markov Chains. *Pennsylvania State University, CiteSeerX Archives*. 2002. P. 17.

136. Hua D. et al. Reliability estimation of load sharing capacity-c-out-of-n pairs: G Balanced system. *Prognostics and System Health Management Conference (PHM)*. IEEE, 2015. С. 1–8.

137. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / пер. с англ. В. Сыромятникова, Г. Деминой. Москва: Машиностроение, 1984. 528 с.

138. Zhai Q. et al. Multi-Valued Decision Diagram-Based Reliability Analysis of  $k$ -out-of- $n$  Cold Standby Systems Subject to Scheduled Backups. *IEEE Transactions on Reliability*. 2015. Т. 64. №. 4. С. 1310–1324.

139. Стернин М.Ю., Шепелев Г.И. Метод представления знаний в интеллектуальных системах поддержки экспертных решений. *Новости искусственного интеллекта*. 2003. № 4. С. 26–34.

140. Головина Е.Ю. Программные инструментальные средства для создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений на базе логико-семиотического аппарата. *Новости искусственного интеллекта*. 2002.

№ 3. С. 41.

141. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / В.А.Акимов, В.Л.Лапин, В.М.Попов и др. М.: Деловой экспресс, 2002. 367 с.

142. Информационные технологии. Численные методы решения. Математические модели социально-экономических процессов. Управление рисками и безопасностью. Динамические системы / Под ред. С.В. Емельянова. Москва: Красанд, 2012. 144 с.

143. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Некоторые базовые принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени. *Изв. РАН. ТуСУ*. 2001. № 6. С. 114–123.

144. Щебеко Ю. Н., Гордиенко Д. М., Малкин В. Л., Смолин И. М. и др. Оценка индивидуального и социального риска пожаров и взрывов для многотопливной автозаправочной станции. *Пожаровзрывобезопасность*. 2009. № 6. С. 42–47.

145. Храмцов Б.А., Гаевой А.П., Дивиченко И.В. Промышленная безопасность опасных производственных объектов: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2007. 187 с.

146. Risk Spectrum. Комплекс Risk Spectrum: электронный ресурс. URL: <http://www.riskspectrum.com/>

147. Проурзин В.А. Алгоритмы численного анализа надежности и риска для сложной системы на основе деревьев отказов. *Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах*: тр. Междунар. Научн. Школы (МА БРК 2001). СПб.: Издательство ООО «НПО «Омега», 2001. С. 263–268.

148. Программный комплекс BUNKER: электронный ресурс. URL: <http://www.ipu.rssi.ru/kommer/komm.htm>

149. RAY. Программный комплекс RAY логико-вероятностного моделирования и расчетов надежности и безопасности систем: электронный ресурс. URL: <http://www.ipu.rssi.ru/kommer/komm.htm>

150. Програма RiskWave: электронный ресурс. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/cgi/koi/ibrae/russian/analysis.html>

151. SAPHIRE. Комплекс программ SAPHIRE: электронный ресурс. URL: <http://www.nea.fr/abs/html/psr-0405.html>

152. Можяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). *Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах*: тр. Междунар. Научн. Школы (МА БРК 2001). СПб.: Издательство ООО «НПО «Омега», 2001. С.56-61.

153. АСМ СЗМА. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования ПК АСМ СЗМА. Регистрационный № 2003611101 Роспатента РФ. URL: <http://www.szma.com> и <http://www.safety.fromru.com>

154. Абрамов О.В. Об оценке вероятности наступления рисковогго события: функционально-параметрический подход. *Надежность и качество сложных систем*. 2016. №1. С.24-31.

155. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб., 2004. 416 с.

156. Можяев А.С., Громов В.И. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб. ВИТУ, 2000. 235 с.

## Додаток А. Програмні комплекси автоматизованого моделювання та розрахунку показників надійності і безпеки систем

Таблиця А.1

Програмні комплекси автоматизованого моделювання та розрахунку показників надійності і безпеки систем різних видів, класів і призначення

Назва	Країна-виробник	Призначення	Форма вихідної структурної схеми
1	2	3	4
Risk Spectrum	Швеція, фірма Relcon	Дозволяє обчислювати статичні ймовірності відмови, коефіцієнт неготовності і частоту відмов досліджуваної системи. Виконує автоматичну побудову та аналіз мінімальних перерізів відмов. Основне застосування Risk Spectrum отримав у ймовірнісному аналізі безпеки об'єктів атомної енергетики на стадії проектування [146]	Дерево відмов
ПК чисельного аналізу надійності і ризику для складної системи	Росія, Санкт-Петербург, лабораторія надійності ІПМАШ РАН	Програмний комплекс реалізовано на основі дерев відмов (автор Проурзін В.А.) [147]	Дерево відмов
BUNKER	Росія, Москва	Моделювання та розрахунків надійності і продуктивності технічних систем з накопичувачами [148]	Дерево відмов
RAY	Росія, Москва	логіко-ймовірнісне моделювання та розрахунки надійності та безпеки систем [149]	Граф зв'язності
RiskWave	Росія	Реалізує метод аналітико-статистичного моделювання дерев подій і дерев відмов [150]	Дерево відмов і дерево подій
SAPPHIRE	США, штат Айдахо, Національна технічна лабораторія (INEL)	Призначений для ймовірнісного аналізу надійності, безпеки та ризику атомних електростанцій. Дозволяє створювати дерева відмов і дерева подій, генерувати мінімальні перетини і логічні послідовності, виконувати аналіз значущості та невизначеності, зберігати і документувати результати [151]	Дерево відмов і дерево подій



## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
Ризикон-Надійність	Україна, м. Сєвєродонецьк	Визначає і виконує аналіз мінімальних перетинів відмов	Дерево відмов і дерево подій
ПК АСМ 2001	Росія	<p>Теоретичною основою програмного комплексу автоматизованого структурно-логічного моделювання [152, 153] є загальний логіко-ймовірнісний метод системного аналізу [154, 155, 156], який реалізує всі можливості основного апарату моделювання алгебри логіки в базі операцій «І», «АБО», «НЕ».</p> <p>Комплекс автоматично формує розрахункові аналітичні моделі надійності і безпеки систем і обчислює ймовірність безвідмовної роботи, середній наробіток до відмови, коефіцієнт готовності, середнє напрацювання на відмову, середній час відновлення, ймовірність відмови відновлюваної системи, ймовірність готовності змішаної системи, а також значущості та вклади елементів в різні показники, надійність системи в цілому. Дозволяє також автоматично визначати найкоротші шляхи успішного функціонування, мінімальні перетини відмов та їх комбінації.</p>	Схема функціональної цілісності, що дозволяє відобразити практично всі відомі види структурних моделей систем

## Додаток Б. Процес навчання нейронної мережі

№	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w
1	18.7	317.9	220.877	915900000000	75.829	3.898	0.999	0.851	8.145E-10	0.317	0.0001225	0.005241	0.851	1.324E-11	0.162	3.622E-6	108.008	14.949	1	1	0.998	0.86	1070
2	8.5	144.5	100.399	416300000000	65.602	2.374	0.998	0.79	3.595E-12	0.243	9.445E-8	0.0001983	0.79	3.446E-15	0.047	6.289E-12	83.461	11.772	0.995	1	0.717	0.175	820
3	17	289	200.798	832500000000	74.702	3.672	0.999	0.845	4.741E-10	0.309	5.979E-5	0.003654	0.845	4.896E-12	0.142	9.358E-7	104.634	14.523	1	1	0.996	0.804	1030
4	27.2	462.4	321.276	1332000000000	79.725	4.931	1	0.869	5.113E-9	0.345	0.001416	0.019	0.869	6.753E-10	0.26	0.0003714	122.087	16.746	1	1	1	0.973	1210
5	10.2	173.4	120.479	4995000000000	68.096	2.663	0.998	0.807	1.539E-11	0.261	6.4E-7	0.0004469	0.807	2.366E-14	0.064	2.037E-10	88.569	12.441	0.994	1	0.877	0.33	870
6	20.4	346.2	240.957	9990000000000	76.816	4.117	0.999	0.856	1.3E-9	0.324	0.0002278	0.007219	0.856	3.288E-11	0.182	1.171E-5	111.126	15.348	1	1	0.999	0.9	1100
7	13.6	231.2	160.638	6660000000000	71.912	3.191	0.999	0.83	1.185E-10	0.289	9.536E-6	0.001509	0.83	4.787E-13	0.102	2.996E-8	97.327	13.574	0.999	1	0.979	0.621	960
8	15.3	260.1	180.718	7493000000000	73.408	3.436	0.999	0.839	2.516E-10	0.3	2.583E-5	0.002423	0.839	1.633E-12	0.122	1.932E-7	101.149	14.067	0.999	1	0.991	0.726	1000
9	22.1	375.7	261.037	10820000000000	77.648	4.329	0.999	0.86	1.956E-9	0.33	0.0003919	0.009616	0.86	7.606E-11	0.202	3.273E-5	114.073	15.725	1	1	1	0.929	1130
10	25.5	435.5	301.196	12490000000000	79.127	4.736	1	0.867	3.851E-9	0.341	0.0009678	0.016	0.867	3.421E-10	0.241	0.0001811	119.537	16.422	1	1	1	0.963	1180
11	16.5	280.5	194.892	8080380000000	74.34	3.603	0.999	0.873	6.484E-10	0.29	0.00064313	0.00628	0.851	9.31E-12	0.199	4.229E-7	155.977	14.393	0.998	1	0.797	0.152	1020
12	16	272	188.986	7835200000000	73.963	3.534	0.999	0.852	8.245E-10	0.367	0.00076657	0.0011	0.825	4.555E-11	0.12	1.0659E-7	154.202	14.259	0.996	1	0.994	0.593	1010
13	28.4	482.8	335.45	13908000000000	80.106	5.067	1	0.875	5.646E-10	0.352	0.00037342	0.00952	0.895	1.554E-11	0.176	8.418E-7	190.894	16.967	0.998	1	0.753	0.537	1250
14	37.1	630.7	438.211	18168600000000	82.042	5.991	1	0.832	6.844E-10	0.34	0.00098195	0.00172	0.871	6.741E-11	0.16	8.5201E-7	210.846	18.398	1	1	0.847	0.45	1400
15	20.3	345.1	239.776	99413200000000	76.761	4.104	0.999	0.807	9.32E-10	0.384	0.00068985	0.00361	0.879	8.379E-11	0.064	7.7899E-7	168.479	15.326	0.995	1	0.886	0.271	1100
16	14.3	243.1	168.906	70030000000000	72.555	3.293	0.999	0.832	8.099E-10	0.326	0.0009028	0.00272	0.888	4.65E-12	0.18	6.6496E-7	147.891	13.782	0.999	1	0.763	0.684	980
17	34	636.8	441.755	14103900000000	82.087	6.021	1	0.873	2.099E-10	0.321	0.00054483	0.00637	0.817	3.148E-11	0.227	1.5289E-7	211.478	18.443	0.998	1	0.899	0.9	1410
18	23.3	396.1	275.211	11410500000000	78.235	4.475	0.999	0.896	3.224E-10	0.284	0.00062151	0.00867	0.829	7.038E-11	0.19	2.5989E-7	177.343	15.979	0.999	1	0.997	0.352	1150
19	24.7	419.9	291.747	12096100000000	78.819	4.642	0.999	0.837	3.943E-10	0.328	0.00042073	0.0065	0.843	8.956E-11	0.214	9.6951E-7	181.235	16.264	1	1	0.937	0.261	1190
20	31.9	542.3	376.791	15622100000000	81.041	5.45	1	0.848	8.038E-10	0.314	0.00077897	0.00678	0.877	8.167E-11	0.138	4.6277E-7	199.328	17.575	0.996	1	0.942	0.501	1290
21	14.2	241.4	167.725	69540200000000	72.466	3.279	0.999	0.843	5.587E-10	0.269	0.000656	0.00268	0.802	1.718E-11	0.191	1.3556E-7	147.506	13.753	0.996	1	0.971	0.587	990
22	16.3	277.1	192.529	79824400000000	74.191	3.576	0.999	0.827	1.972E-10	0.308	0.00073533	0.00138	0.806	1.222E-11	0.111	8.1138E-7	155.271	14.34	0.997	1	0.851	0.791	1020
23	14.8	251.6	174.812	72478600000000	72.991	3.365	0.999	0.895	7.787E-10	0.323	0.00084183	0.00197	0.855	1.909E-11	0.057	2.4677E-7	149.794	13.926	0.998	1	0.781	0.773	990
24	28	476	330.725	13712200000000	79.982	5.022	1	0.834	8.429E-10	0.376	0.0009665	0.00289	0.814	1.154E-11	0.162	4.4921E-7	193.889	16.894	0.997	1	0.767	0.639	1240
25	25.1	426.7	296.472	12292000000000	78.975	4.689	1	0.816	8.35E-10	0.289	0.0001024	0.00485	0.886	4.971E-11	0.124	1.5742E-7	182.321	16.343	1	1	0.853	0.191	1200
26	10.4	423.3	294.109	12194000000000	78.897	4.665	0.999	0.833	7.892E-10	0.341	8.124E-5	0.00762	0.823	1.898E-11	0.12	1.579E-8	181.779	16.304	0.998	1	0.886	0.441	1190
27	10	170	118.116	48972000000000	67.827	2.63	0.998	0.867	9.995E-10	0.351	0.00085602	0.00121	0.872	2.418E-11	0.182	9.8169E-7	129.467	12.366	0.998	1	0.89	0.495	860
28	28.8	489.6	340.175	14103900000000	80.225	5.111	1	0.838	2.488E-10	0.272	0.00042337	0.00193	0.848	2.704E-11	0.132	4.831E-8	191.89	17.039	0.995	1	0.809	0.774	1260
29	30	510	354.349	14691600000000	80.563	5.244	1	0.85	2.45E-10	0.393	0.00088233	0.0088	0.855	3.485E-11	0.22	6.268E-8	194.826	17.251	0.996	1	0.838	0.212	1280
30	27.8	472.6	328.363	13614200000000	79.92	4.999	1	0.832	7.772E-10	0.338	0.00092121	0.00859	0.817	5.418E-11	0.2	2.6297E-7	189.384	16.857	0.995	1	0.82	0.429	1220
31	25.9	440.3	305.921	12683700000000	79.274	4.782	1	0.84	4.618E-10	0.293	0.00033922	0.00849	0.8	3.816E-11	0.148	5.4184E-8	184.461	16.5	0.998	1	0.929	0.821	1190
32	14	238	165.363	68560800000000	72.284	3.25	0.999	0.807	5.476E-10	0.34	0.00048409	0.00394	0.88	7.971E-11	0.201	7.838E-8	146.73	13.694	0.998	1	0.838	0.569	980
33	25.2	428.4	297.653	12340900000000	79.013	4.701	1	0.884	8.486E-10	0.338	0.00070752	0.00168	0.84	3.969E-11	0.085	8.566E-8	182.591	16.363	0.996	1	0.796	0.446	1180
34	15.7	266.9	185.442	76886000000000	73.729	3.493	0.999	0.88	4.31E-10	0.305	0.0005152	0.006	0.829	6.229E-11	0.249	6.5349E-7	153.12	14.178	0.996	1	0.967	0.713	1020
35	22.7	385.9	268.124	1111660000000000	77.965	4.402	0.999	0.843	1.69E-10	0.377	0.00073994	0.00454	0.892	8.937E-11	0.21	6.9754E-7	175.63	15.853	1	1	0.829	0.17	1150

Рис. Б.1 Набір вхідних даних для побудови нейронної мережі

№	Столбец	Тип даних	Вид даних	Пропуски		Выбросы		Экстремальные		Количество уникальных	Качество данных	Резюме
				Количество	Действие	Количество	Действие	Количество	Действие			
1	a	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.995	Пригоден
2	b	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.995	Пригоден
3	c	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.995	Пригоден
4	d	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.995	Пригоден
5	e	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.869	Пригоден
6	f	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9818	Пригоден
7	g	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.3894	Пригоден
8	h	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9584	Пригоден
9	i	9.0 Вещественный	Непрерывный			1	Ограничить	2	Ограничить		0.3341	Предобработка
10	j	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9828	Пригоден
11	k	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.8478	Пригоден
12	l	9.0 Вещественный	Непрерывный			2	Ограничить				0.7538	Предобработка
13	m	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9772	Пригоден
14	n	9.0 Вещественный	Непрерывный					2	Ограничить		0.2916	Предобработка
15	o	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9844	Пригоден
16	p	9.0 Вещественный	Непрерывный					2	Ограничить		0.0194	Предобработка
17	q	9.0 Вещественный	Непрерывный			2	Ограничить				0.8664	Предобработка
18	r	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9578	Пригоден
19	s	9.0 Вещественный	Непрерывный					1	Ограничить		0.5932	Предобработка
20	t	9.0 Вещественный	Дискретный							1	0.0000	Непригоден
21	u	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9393	Пригоден
22	v	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9957	Пригоден
23	w	9.0 Вещественный	Непрерывный								0.9636	Пригоден

Рис. Б.2 Анализ качества входных данных

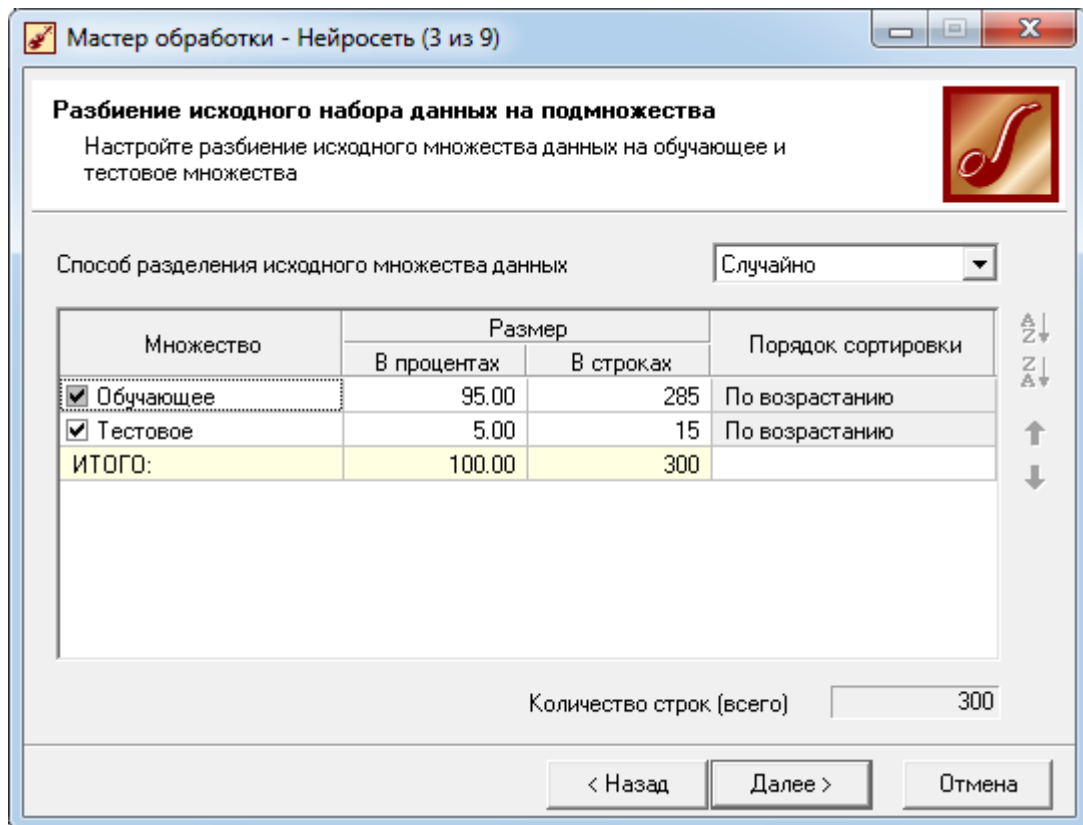


Рис. Б.3 Розбиття вхідного набору даних на підмножини

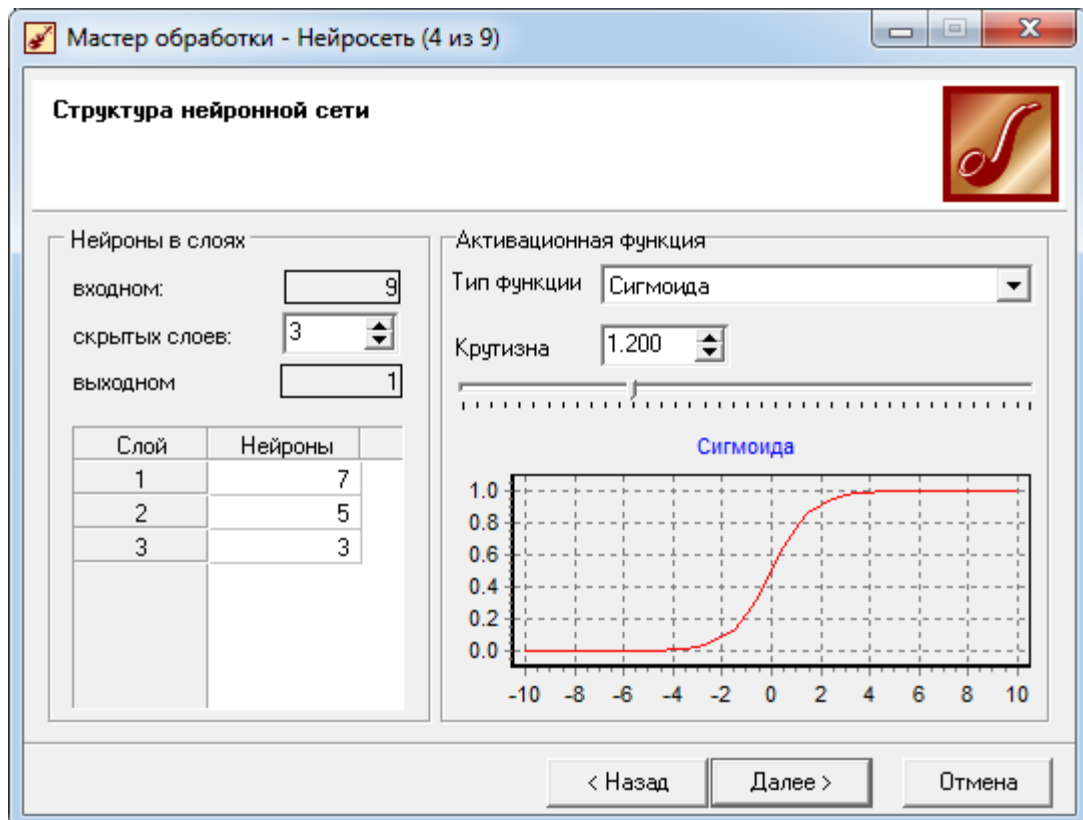


Рис. Б.4 Структура нейронної мережі

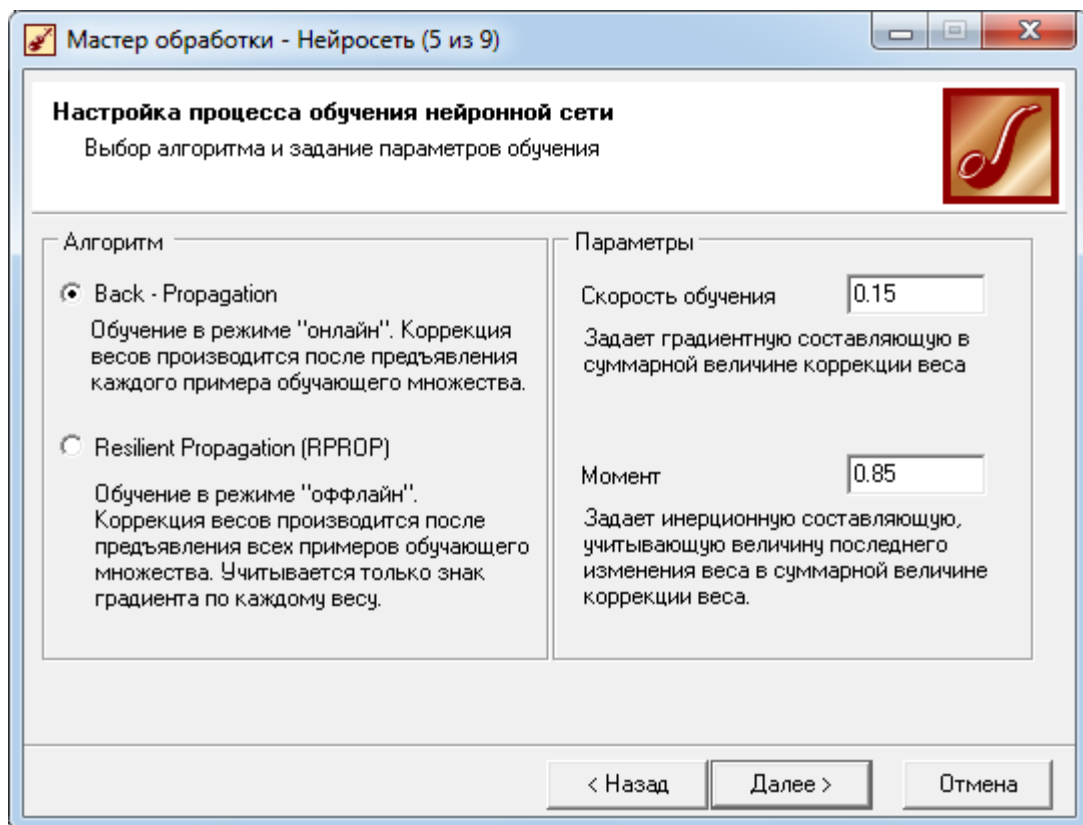


Рис. Б.5 Налаштування процесу навчання нейронної мережі

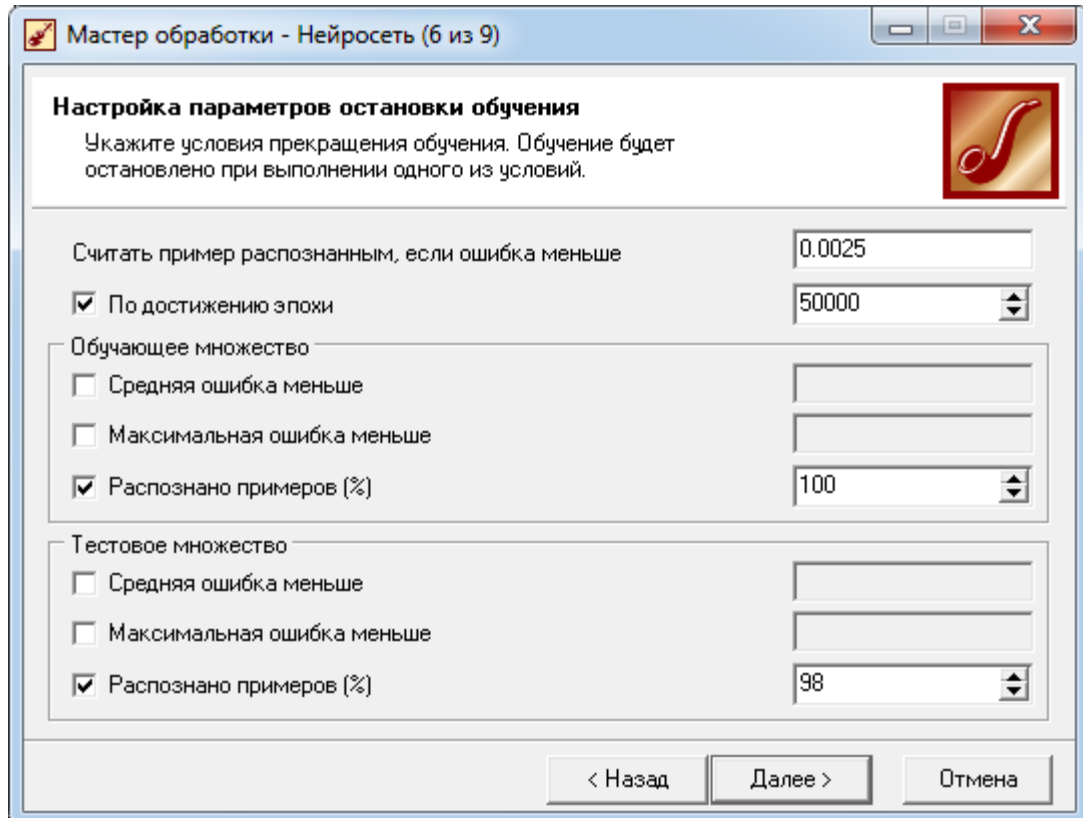


Рис. Б.6 Налаштування параметрів завершення навчання нейронної мережі

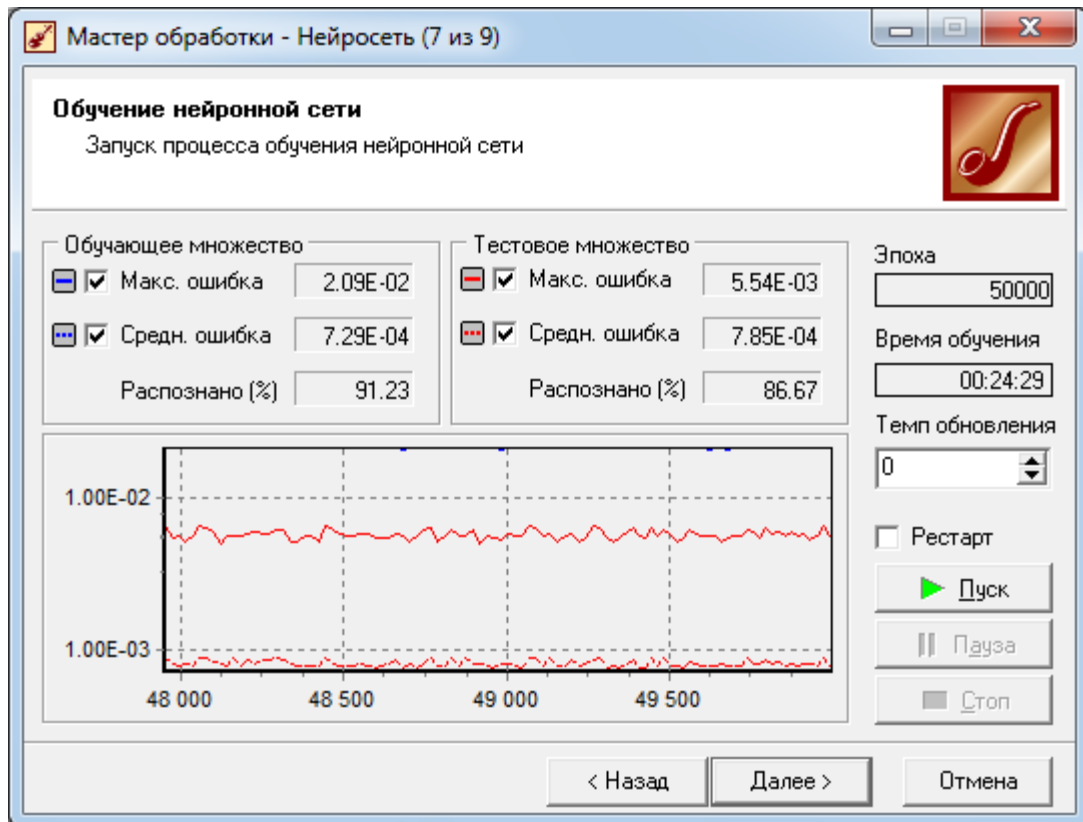
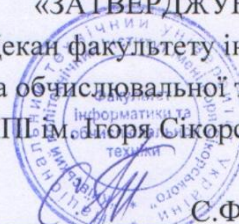


Рис. Б.7 Процес навчання нейронної мережі

**Додаток В. Акти впровадження**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Декан факультету інформатики  
та обчислювальної техніки  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
  
С.Ф. Теленик  
« 25 » 11 2019 р.

**АКТ**

про впровадження в навчальний процес кафедри технічної кібернетики факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» результатів дисертаційної роботи Завгородньої Ганни Анатоліївни «Моделі, методи та інформаційна технологія підвищення надійності об'єкта техногенної небезпеки», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Ми, що нижче підписалися: завідувач кафедри технічної кібернетики, д.т.н. проф. Пархомей І.Р., заступник завідувача кафедри, к.т.н., доц. Ткач М.М., вчений секретар кафедри, к.т.н., доц. Ліхоузова Т.А. розглянувши матеріали навчально-методичного забезпечення курсів: «Бази даних» та «Інфраструктура інформаційних технологій», які підготовлені та викладаються старшим викладачем Загородньою Г.А., встановили, що в навчальному процесі на лекційних та лабораторних заняттях, а також в процесі підготовки магістерських і бакалаврських атестаційних робіт використовуються такі наукові результати, отримані дисертантом особисто:

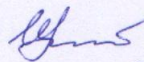
- алгоритм застосування формального апарату опису предметної області, що дозволяє переносити його до інформаційної системи та використовувати при обробці інформації про стан об'єкта;

- механізми представлення знань, які дозволяють виконувати обчислення на основі багатозначної логіки для обробки знань, що містять елементи невизначеності;

- інформаційна технологія для автоматизації процесів вироблення рішень при управлінні складними об'єктами.

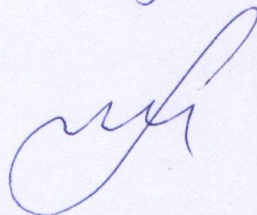
Впровадження результатів дисертаційної роботи Завгородньої Г.А. в навчальний процес дозволило підвищити якість підготовки студентів бакалаврату спеціальностей 121 «Інженерія програмного забезпечення» та 126 «Інформаційні системи та технології» на кафедрі технічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Завідувач кафедри  
технічної кібернетики,  
д.т.н., проф.



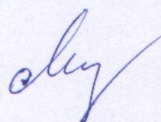
І.Р. Пархомей

Заст. завідуючого кафедри,  
к.т.н., доц.



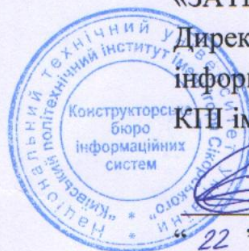
М.М. Ткач

Вчений секретар кафедри  
технічної кібернетики,  
к.т.н., доц.



Т.А. Ліхоузова

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Конструкторського бюро  
інформаційних систем

КПІ ім. Ігоря Сікорського

О.Д. Фіногенов

" 22 " 11 2019 р.

**АКТ**

про використання результатів дисертаційної роботи  
Завгородньої Ганни Анатоліївни на тему «Моделі, методи та інформаційна  
технологія підвищення надійності об'єкта техногенної небезпеки»,  
поданої на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук  
при розробці інформаційних систем

Комісія в складі: начальник відділу математичного та програмного забезпечення ЄІС університету Габзовська О.Б. – голова комісії; провідний інженер, канд. техн. наук Мелкумян К.Ю., інженер 1 категорії Ромашкевич Я.О. – члени комісії; розглянула матеріали звітів та результати роботи під час розробки та впровадження в 2015-2019 роках інформаційних систем та встановила наступне.

В процесі розробки інформаційних систем впроваджені наступні результати дисертаційної роботи Завгородньої Г.А. «Моделі, методи та інформаційна технологія підвищення надійності об'єкта техногенної небезпеки», які отримані нею особисто:

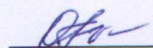
- Розроблені механізми оцінки імовірності виникнення аварії на об'єктах техногенної небезпеки, із застосуванням «дерева відмов» для виявлення комбінацій відмов устаткування, помилок персоналу і зовнішніх впливів, що приводять до аварійної ситуації. Отримані імовірності реалізації сценаріїв аварії стали основою для розрахунку показників та аналізу ризиків.



- Запропоновані механізми оцінки соціального ризику із застосуванням нейронних мереж. Результати роботи інформаційної системи були порівняні з результатами навчання нейронної мережі, що визначає значення відстані, на якій досягається прийнятний рівень соціального ризику, із встановленням відносної похибки розрахунків.
- Розроблені механізми подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій, які дозволяють виконувати обчислення на основі багатозначної логіки для обробки знань, що містять елементи невизначеності. Реалізація даного методу припускає рішення як розрахункових, так і логіко-аналітичних завдань, що обумовлено застосуванням методів штучного інтелекту.
- Розроблено інформаційну систему, яка призначена для вирішення завдань управління ризиком і орієнтована на вирішення завдань інформаційної підтримки процесів управління ризиками при експлуатації об'єктів техногенної небезпеки.

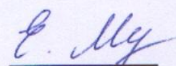
Тестові випробування і практичне застосування інформаційних систем підтвердили коректність та ефективність запропонованих проектних рішень та достовірність відповідних положень дисертаційної роботи.

Голова комісії

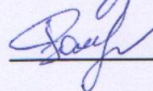


О.Б. Габзовська

Члени комісії:



К.Ю. Мелкумян



Я.О. Ромашкевич

### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Завгородньої Ганни Анатоліївни на тему «Моделі, методи та інформаційна технологія підвищення надійності об'єкта техногенної небезпеки», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія зі складу фахівців ТОВ «Нафтогазбудінформатика»:

Голова:

Виконавчий директор к.е.н.

Топчій В.М.

Члени комісії:

Головний спеціаліст

Куцан Н.В.

Провідний спеціаліст

Волкова Н.П.

розглянула матеріали звітів та результати роботи під час впровадження в 2017-2019 роках інформаційної системи підвищення надійності АГЗС і встановила наступне.

В процесі розробки інформаційної системи впроваджені наступні результати дисертаційної роботи Завгородньої Г.А. «Моделі, методи та інформаційна технологія підвищення надійності об'єкта техногенної небезпеки», які отримані нею особисто:

- механізми управління ризиком виникнення аварій на АГЗС на основі моделі функціонування інформаційної системи;
- механізми подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій на АГЗС;
- механізми виробки рішень при аварійних ситуаціях техногенного характеру у системах управління реального часу для АГЗС;
- інформаційна система для автоматизації процесів виробки рішень при управлінні наслідками надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Тестові випробування і практичне застосування інформаційної системи підвищення надійності АГЗС підтвердили коректність та ефективність запропонованих проектних рішень та достовірність відповідних положень дисертаційної роботи.

Голова комісії:

Виконавчий директор к.т.н.

Топчій В.М.

Члени комісії:

Головний спеціаліст

Куцан Н.В.

Провідний спеціаліст

Волкова Н.П.



## Додаток Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації

### *Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2018. Вип. 4 (111). С. 43–48. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.4.43-48. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

*Автору належить підхід до формалізації знань про процеси оцінки ситуації з урахуванням невизначеності і динамічності зміни обстановки та з аналізом можливих шляхів розвитку ситуації*

2. Отрох С.І., Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Грищенко О.О. Аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2018. №3 (51). С. 59-69. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

*Автору належить аналіз методів оцінки приналежності інформаційних ознак до конкретних ситуацій у процесі їх розпізнавання.*

3. Отрох С.І., Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Аналіз взаємозв'язку збитку з ризиком при виникненні техногенних аварій в концепції прийнятного ризику. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2018. №2 (59). С. 117-123. DOI: 10.31673/2412-4338-2018-0-2-117-123. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

*Автору належить розробка та опис модуля інформаційної системи аналізу ризику для оцінки соціально-економічних збитків від виникнення техногенної аварії.*

4. Zavgorodnii V., Zavgorodnya A., Maiko V., Malikov V., Zhuk D. Methods

and models for assessment of reliability of structural-complex systems. *World Science*. Warsaw: RS Global Sp. z O.O., 2018. №11 (39). PP. 5-14. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/30112018/6227 (Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus).

*Автору належить модель сценарію небезпечного стану та виконання кількісного дослідження надійності складної системи при взаємозалежності базових подій.*

5. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Метод кількісної оцінки ризику технічних систем. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології»*. Київ: ДУІТ, 2018. Вип. 2 (32). С. 87-95. DOI: 10.32703/2617-9040-2018-32-2-87-95 (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

*Автору належить реалізація практичного застосування математичної імовірнісної моделі для прогнозування індивідуального і соціального ризику з використанням інформаційної системи.*

6. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Модель управління ризиком об'єктів підвищеної небезпеки. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2018. №18. С. 52-55. DOI: 10.25313/2520-2057-2018-18-4261. (Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus).

*Автору належить дослідження питань побудови моделі, яка описує діяльність об'єктів підвищеної небезпеки, і методів прогнозування та оцінки ризиків на цій моделі.*

7. Завгородня Г.А., Корнага Я.І., Мухін В.Є., Завгородній В.В., Базака Ю.А. Моделювання сценаріїв аварійних ситуацій на автомобільних газозаправних станціях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69), №5, Частина 1. С. 92-97. DOI: 10.32838/2663-5941/2019.5-1/14. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus)

International (Республіка Польща).

*Автору належить дослідження реальних аварійних ситуацій, дані яких використовувались в якості вхідної інформації для побудови дерев відмов. Декомпозиція цих ситуацій дозволила побудувати моделі причинно-наслідкових зв'язків розвитку сценаріїв прогнозованих небезпек.*

8. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Аналіз методів виробки рішень при виникненні техногенних аварій у системах управління реального часу. *Вісник університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика.* Київ, 2018. №2 (21/2). С.72-76. (Журнал включено до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук).

*Автору належить розробка методу синтезу варіантів рішень, який дозволяє використати адаптивні алгоритми управління з моделюванням розумової діяльності людини.*

9. Zavgorodnya A., Zavgorodnii V., Plisenko V., Provatorov N., Kudientsov P. Methods modeling systems for the improvement of their reliability. *International Academy Journal Web of Scholar.* 2019. № 9(39), Vol.1. PP. 3-12. DOI: 10.31435/rsglobal\_wos/30092019/6683 (Індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus).

*Автору належить розрахунок наближеного значення ймовірності відмови системи та аналіз відмов з метою підвищення надійності функціонування системи.*

***Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

10. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Методи аналізу відмов та ризику аварій. *Євроінтеграція в науці та інноваціях: тези доповідей LXI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернівці, 15-16 жовтня 2018 р.).* Київ: Науково-видавничий центр «Лабораторія думки», 2018. С.18-21.

*Автору належить аналіз методів дерев подій та дерев відмов.*

11. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Аналіз рівня безпеки у концепції

прийняттого ризику. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення:* тези доповідей I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Житомир, 19-20 жовтня 2018 р.). Житомир: Вид. О.О. Євенок, 2018. С.43-44.

*Автору належить обґрунтування вимог до вибору критерію прийняттого ризику при його аналізі.*

12. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Автоматизоване моделювання етапів загального логіко-імовірнісного методу. *Механізми та стратегії розвитку господарюючих суб'єктів в умовах інтеграційних процесів:* матеріали науково-практичної INTERNET-конференції студентів та молодих вчених з міжнародною участю, Wyższa Szkoła Społeczno-Gospodarcza w Przeworsku. (м. Харків – Пшеворськ, 19 лютого 2019 р.). Przeworsk: WSSG, 2019. С. 115-117.

*Автору належить узагальнення етапів подієво-логічного підходу, що лежить в основі вирішення завдань моделювання і розрахунку надійності систем за допомогою загального логіко-імовірнісного методу.*

13. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Методи оцінки надійності людино-машинної системи. *Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та праві:* матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 18-19 квітня 2019 р.). Київ: КНУКіМ, 2019. Ч1. С.30-31.

*Автору належить побудова спрощеної математичної моделі поведінки людини в умовах виникнення аварійної ситуації.*

14. Завгородня Г.А., Завгородній В.В. Шляхи підвищення надійності складних технічних систем в умовах експлуатації. *Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку:* збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 16-17 травня 2019 р.). Київ: ДУІТ, 2019. С. 156-158.

*Автору належить аналіз заходів підвищення надійності складних технічних систем в умовах їх експлуатації.*

15. Завгородня Г.А. Інформаційна система підвищення надійності потенційно небезпечних об'єктів. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення:* збірник тез доповідей

міжнародної наукової інтернет-конференції: випуск 41 (м. Тернопіль, 13 вересня 2019 р.). Тернопіль, 2019. С. 23-24.

16. Завгородня Г.А. Напрямки підвищення рівня безпеки потенційно небезпечних об'єктів. *Вересневі наукові читання: збірник наукових матеріалів XXXIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* (м. Вінниця, 16 вересня 2019 року.). Вінниця, 2019. Ч.2, С. 9-13.

## Відомості про апробацію результатів дисертації

№ з/п	Назви конференції, конгресу, симпозіуму, семінару, школи	Місце проведення	Дата проведення	Форма участі
1.	LXI Міжнародна науково-практична конференція «Євроінтеграція в науці та інноваціях»	м. Чернівці	15-16 жовтня 2018 р.	заочна
2.	I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення»	м. Житомир	19-20 жовтня 2018 р.	заочна
3.	Науково-практична INTERNET-конференція студентів та молодих вчених з міжнародною участю «Механізми та стратегії розвитку господарюючих суб'єктів в умовах інтеграційних процесів»	м. Харків – Пшеворськ	19 лютого 2019 р.	заочна
4.	Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та праві»	м. Київ	18-19 квітня 2019 р.	очна
5.	Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку»	м. Київ	16-17 травня 2019 р.	очна
6.	Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення»	м. Тернопіль	13 вересня 2019 р.	заочна
7.	XXXIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Вересневі наукові читання»	м. Вінниця	16 вересня 2019 р.	заочна