

УДК 519.85

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200384

**ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ
ТЕХНОГЕННОГО РИЗИКУ ПРОМИСЛОВОГО ОБ'ЄКТУ ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО**

Бойко Т. В., Абрамова А. О., Складанний Д. М., Вавулін П. А.

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ
ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО**

Бойко Т. В., Абрамова А. А., Складанный Д. Н., Вавулин П. А.

**SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE TECHNOGENIC RISK
ASSESSMENT METHOD OF AN INDUSTRIAL OBJECT USING THE
MONTE-CARLO METHOD**

Bojko T., Abramova A., Skladannyu D., Vavulin P.

Об'єктом дослідження є техногенний ризик промислового об'єкта. Одним із найбільш проблемних місць є невизначеність вихідної інформації щодо об'єкту дослідження та відсутність універсальної методики, що дозволяла би проводити оцінювання техногенних ризиків на усіх стадіях функціонування промислового об'єкта. Особливо така гостра проблема стосується потенційно-небезпечних виробництв.

Проведено аналіз існуючих методів та підходів до оцінювання техногенних ризиків промислових об'єктів на різних стадіях їх функціонування. Встановлено, що одним із найкращих методів є метод Монте-Карло, який дозволяє кількісно оцінювати невизначеність рішень. Обґрунтовано використання методу Монте-Карло при проведенні кількісного аналізу небезпек з метою визначення ймовірності аварій та нещасних випадків, величини ризику, величини можливих наслідків.

В ході дослідження використано елементи теорії надійності для кількісного оцінювання ризиків. Кількісний аналіз небезпек у відповідності до теорії надійності дає змогу визначити ймовірність аварій та нещасних випадків, величину ризику, величину можливих наслідків. Методи розрахунку ймовірностей та статистичний аналіз є складовими частинами кількісного аналізу небезпек та техногенного ризику.

Розроблено алгоритм визначення техногенного ризику промислового об'єкта із використанням теорії надійності. Розроблено програмний комплекс на основі теорії надійності із поєднанням моделювання роботи системи методом Монте-Карло. Розроблений програмний комплекс дозволяє проаналізувати рівні техногенного ризику при використанні тих чи інших способів з'єднання елементів системи, а також оцінити зміни надійності системи при використанні інших складових елементів. Роботу програми

представлено на прикладі системи, складовими елементами якої є підігрівачі ПВТІ-7 (Україна) в технологічній системі ТЕЦ (теплова електростанція). Досліджувана система знаходиться на границі неприйняттого та умовно-прийняттого рівнів небезпеки, що дає підстави для необхідності вжиття заходів по збільшенню надійності системи шляхом збільшення кількості резервних елементів системи, або поліпшення їх якості.

Ключові слова: техногенний ризик, метод Монте-Карло, теорія надійності, програмний комплекс, надійність системи.

Объектом исследования является техногенный риск промышленного объекта. Одним из самых проблемных мест является неопределенность исходной информации относительно объекта исследования и отсутствие универсальной методики, которая позволяла бы проводить оценку техногенных рисков на всех стадиях функционирования промышленного объекта. Особенно такая острая проблема касается потенциально опасных производств.

Проведен анализ существующих методов и подходов к оценке техногенных рисков промышленных объектов на разных стадиях их функционирования. Установлено, что одним из лучших методов является метод Монте-Карло, который позволяет количественно оценивать неопределенность решений. Обосновано использование метода Монте-Карло при проведении количественного анализа опасностей с целью определения вероятности аварий и несчастных случаев, величины риска, величины возможных последствий.

В ходе исследования использованы элементы теории надежности для количественной оценки рисков. Количественный анализ опасностей в соответствии с теорией надежности позволяет определить вероятность аварий и несчастных случаев, величину риска, величину возможных последствий. Методы расчета вероятностей и статистический анализ являются составными частями количественного анализа опасностей и техногенного риска.

Разработан алгоритм определения техногенного риска промышленного объекта с использованием теории надежности. Разработан программный комплекс на основе теории надежности в сочетании с моделированием работы системы методом Монте-Карло. Разработанный программный комплекс позволяет проанализировать уровень техногенного риска при использовании тех или иных способов соединения элементов системы, а также оценить изменения надежности системы при использовании других составляющих элементов. Работу программы представлено на примере системы, составными элементами которой являются подогреватели ПВТІ-7 (Украина) в технологической системе ТЭЦ (тепловая электростанция). Исследуемая система находится на границе неприемлемого и условно-приемлемого уровня опасности, что дает основания для необходимости принятия мер по увеличению надежности системы путем увеличение количества резервных элементов системы, или улучшения их качества.

Ключевые слова: техногенный риск, метод Монте-Карло, теория надежности, программный комплекс, надежность системы.

1. Вступ

На сьогоднішній день існує велика кількість методик оцінювання ризику. Різноманітність технологічних схем, обмеженість початкових даних, складність визначення наслідків аварій та їх можливих сценаріїв розвитку позначаються на процедурі оцінювання ризику та приводять до ситуацій використання методик не за призначенням. Це в подальшому призводить до негативного впливу на адекватність оцінювання ризику при експлуатації потенційно-небезпечних виробництв. Тому вдосконалення математичного та методологічного апарату для кількісного та якісного аналізування ризику та створення універсального алгоритму ризик-аналізу є перспективним і актуальним питанням в світі.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – техногенний ризик промислового об'єкта.

Одним із характерних недоліків, що притаманні об'єкту дослідження є невизначеність вихідної інформації та відсутність універсальної методики, що дозволяла би проводити оцінювання техногенних ризиків на усіх стадіях функціонування промислового об'єкта. Особливо така гостра проблема стосується потенційно-небезпечних виробництв.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розроблення програмної реалізації методики оцінювання техногенних ризиків промислових об'єктів для полегшення прийняття рішень щодо умов експлуатації промислового об'єкта та його стану. Оцінювання техногенного ризику пропонується здійснювати спираючись на теорію надійності із поєднанням моделювання роботи системи методом Монте-Карло.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити алгоритм визначення техногенного ризику промислового об'єкта із використанням теорії надійності.
2. Здійснити апробацію розробленої методики оцінювання техногенних ризиків на прикладах із використанням програмного комплексу.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Питання оцінювання та аналізування техногенних ризиків на сьогоднішній день є одним із напрямів щодо підвищення декларування промислової безпеки в Україні і в світі в цілому. Провівши аналізування нормативів та існуючої методики оцінювання ризиків [1, 2], можна дійти висновків, що вони не дають явного уявлення про порядок та методи оцінювання техногенного ризику.

Теорія аналізу ризику створена багатьма вченими, які запропонували методологію оцінювання безпеки та ризику, яка і сьогодні широко застосовується у світовій практиці.

Напрямок оцінювання техногенних і екологічних ризиків знайшов відображення у роботі [3], але запропоновані процедури та методики не дозволяють провести оцінювання техногенних ризиків у разі виникнення аварій.

Роботи [4, 5] присвячені розробленню комплексного методу оцінки ризиків. В цих роботах запропонована матрична модель оцінки ризиків, але не приділено увагу розрахунку рівня ризиків при нормальній експлуатації об'єкта.

Автори досліджень [6, 7] вважають, що питання, які пов'язані з трактуванням поняття «ризик» мають деяку невизначеність, що не дозволяє розробити універсальну процедуру його оцінювання. Автори пропонують розглядати ризик як ймовірнісну величину та пропонують складати графи подій при оцінюванні ризику аварій. Але залишається питання чисельного визначення величини такого ризику.

У роботі [8] наголошується, що аварія є випадковою величиною, завжди існує ймовірність її появи, тому не можна обмежуватися зниженням ризику до прийняттого рівня. Згідно із концепцією прийняттого рівня ризику, що прийшов на зміну концепції абсолютної безпеки, пропонується передбачити заходи щодо локалізації аварії та ліквідації її наслідків. З цією метою заздалегідь створюються системи підтримки прийняття рішень в аварійних ситуаціях, що дозволяють особі, яка приймає рішення за допомогою реалізації оптимальних і найбільш ефективних заходів, за попередньо розрахованими сценаріями звести до мінімуму наслідки від аварії.

У роботі [9] пропонується проводити оцінювання ризику методом «дерев сценаріїв» з використанням в якості основного методу – метод Монте-Карло, який дозволяє отримати більш точні результати. Метод Монте-Карло можна віднести до чисельних методів, що використовують моделювання вхідних (вихідних) випадкових величин, і подальше їх математичне перетворення у відповідності із досліджуванним процесом, і побудову вихідних статистичних оцінок для шуканих величин. Досвід вчених показує, що для подібного роду ситуацій варто використовувати метод Монте-Карло, який дозволяє застосовувати будь-які методи аналізу вихідних даних при інтервально-ймовірнісному їх представленні.

Автори роботи [10] підкреслюють, що завдяки методу Монте-Карло та виходячи із очікуваного спектру рішень можна більш чітко сформулювати вимоги до точності, з якою повинні представлятися вихідні дані.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що метод Монте-Карло є найбільш прийнятним для рішення поставлених завдань. Цей метод дозволяє кількісно оцінювати невизначеність рішень, що отримуємо в умовах, коли інформація про деякі данні несе нечіткий характер.

5. Методи досліджень

Методичною базою для кількісного оцінювання ризиків є теорія надійності. У відповідності до цієї теорії, відмова розглядається як випадкова подія, причини відмов задаються функцією розподілу. Кількісний аналіз небезпек у відповідності до елементів теорії надійності дає змогу визначити ймовірність аварій та нещасних випадків, величину ризику, величину можливих наслідків. Методи розрахунку ймовірностей та статистичний аналіз є складовими частинами кількісного аналізу небезпек та техногенного ризику.

Розглянемо показник безвідмовності технічного об'єкту з точки зору його надійності. Таким показником є ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ – ймовірність того, що в заданому інтервалі $t=T$ не виникає відмови даного об'єкта. Значення цієї ймовірності, як і будь-якої іншої лежить в інтервалі $0 \leq P(t) \leq 1$ [1]. Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і ймовірність відмови $F(t)$ утворюють повну групу подій:

$$P(t) + F(t) = 1. \quad (1)$$

Допустиме значення $P(t)$ імовірності обирається в залежності від ступеню небезпечності відмови.

Причина виникнення раптових відмов не пов'язана зі зміною стану об'єкту та часом його попередньої роботи, а залежить лише від рівня зовнішніх чинників. Раптові відмови оцінюються інтенсивністю відмов λ – імовірністю виникнення відмови в одиницю часу, за умови, що до того часу відмов не було [11]:

$$\lambda = \frac{F\left(\frac{\Delta t}{t}\right)}{\Delta t} = \frac{1 - P\left(\frac{\Delta t}{t}\right)}{\Delta t}, \quad (2)$$

де Δt – зміна часу; t – час, с.

Основна закономірність теорії надійності:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda \cdot dt} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt\right]. \quad (3)$$

При розрахунку надійності складної системи використовують структурні схеми (рис. 1).

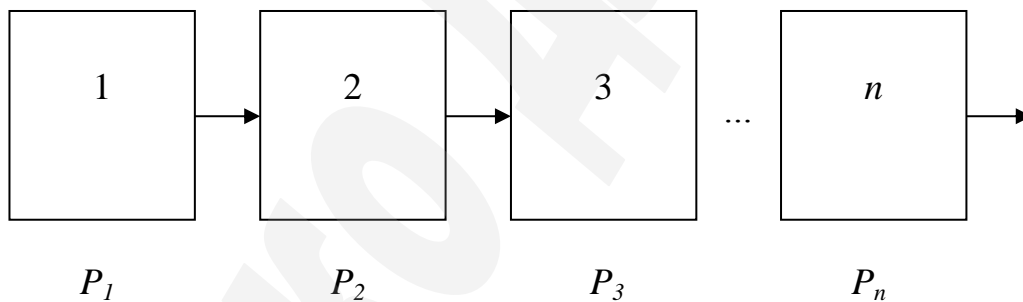


Рис. 1. Структурна схема надійної роботи технічної системи

Ймовірність безвідмовної роботи дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи елементів цієї системи:

$$P(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (4)$$

При постійному (навантаженому) резервуванні, коли резервні елементи постійно підключені до основних і знаходяться в однаковому з ними режимі роботи, відмова системи є складною подією, яка буде мати місце при відмові усіх елементів.

Ймовірність одночасної появи усіх відмов матиме вигляд:

$$F(t) = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot \dots \cdot F_n = \prod_{i=1}^n F_i. \quad (5)$$

Тому безвідмовність системи:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (6)$$

Кількісна оцінка ризику за даною методикою представляє собою оцінювання числових значень ймовірності та наслідків небажаних процесів, явищ, подій, тому до достовірності таких оцінок слід ставитись обережно [11].

Зазвичай при оцінюванні ризику його характеризують двома величинами – ймовірністю події P та наслідками U , які у виразі математичного очікування виступають множниками:

$$R = PX. \quad (7)$$

По відношенню до джерел ризику, його оцінка передбачає розділення нормального режиму роботи R_H та аварійних ситуацій R_{AB} :

$$R = R_H + R_{AB} = P_H X_H + P_{AB} X_{AB}. \quad (8)$$

Техногенний ризик оцінюють за формулою, яка включає як ймовірність небажаної події, так і величину наслідків у вигляді збитків U :

$$R = PU. \quad (9)$$

Якщо кожній події, яка виникає з ймовірністю P_i відповідає збиток U_i , то величина ризику буде представляти очікувану величину збитку U :

$$R = U_* = \sum_{i=1}^n P_i U_i. \quad (10)$$

Логічний аналіз внутрішньої структури системи та визначення ймовірності небажаних подій E як функції окремих подій являється однією з задач аналізу небезпек.

Для автоматизації оцінки небезпек техногенних ризиків промислових об'єктів в процесі нормальної експлуатації було використано наступні математичні моделі відмови системи з декількох елементів.

Через $P\{E_i\}$ будемо позначати ймовірність небажаної події E_i .

Для повної групи подій:

$$\sum_{i=1}^n P\{E_i\} = 1. \quad (11)$$

Для рівно ймовірних подій ($P\{\sum E_i\} = p, i=1, 2, \dots, n$), які утворюють повну групу подій, ймовірність дорівнює $p=1/n$.

Протилежні події E_i і $(-E_i)$ утворюють повну групу подій, тому:

$$P\{E\} = 1 - P\{-E\}. \quad (12)$$

На практиці користуються формулою об'єктивної ймовірності:

$$P\{E\} = \frac{n_E}{n}, \quad (13)$$

де n та n_E – загальне число випадків і число випадків, при яких настає небажана подія E .

Ймовірність події E_1 при умові E_2 позначають $P\{E_1/E_2\}$.

Якщо події E_1 та E_2 незалежні, то отримаємо:

$$P\{E_1 E_2\} = P\{E_1\} P\{E_2\}. \quad (14)$$

При n незалежних подій E, E_1, \dots, E_n отримаємо:

$$P\left\{\prod_{i=1, n} E_i\right\} = \prod_{i=1}^n P\{E_i\}. \quad (15)$$

Для компонентів системи та системи в цілому:

$$\begin{aligned} p_i &= P\{E_i\}, \quad q_i = P\{-E_i\} = 1 - p_i, \\ p &= P\{E\}, \quad q = P\{-E\} = 1 - p. \end{aligned} \quad (16)$$

Логічна функція системи має вигляд:

$$E = F(E_1, E_2, \dots, E_n). \quad (17)$$

Застосовуючи правила теорії ймовірностей, знаходимо ймовірність появи небажаної події у вигляді функції загрози:

$$p = F_p(p_1, p_2, \dots, p_n). \quad (18)$$

До небажаної події в технічній системі, в якій елементи з'єднані послідовно, може призвести відмова будь-якого компонента. Якщо E_j є відмовою j -го компонента, то відмова такої системи виражається наступним рівнянням [11]:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{j=1, m} E_j, \quad (19)$$

де m – число компонентів (елементів) системи.

Якщо відмови елементів незалежні, то ймовірність відмови в такій системі виражається наступним чином:

$$P\left\{\sum_{j=1} E_j\right\} = 1 - P\left\{\sum_{j=1, m} E_j\right\} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P\{E_j\}). \quad (20)$$

Для рівно імовірних відмов ймовірність відмови в такій системі:

$$P\{E\} = 1 - (1 - p)^m. \quad (21)$$

Це демонструє, що у випадку складних систем існує доволі висока ймовірність відмови. Розглянемо системи, елементи яких з'єднанні паралельно. До відмови такої системи призводить лише відмова усіх її елементів:

$$E = E_1 \cdot E_2 \cdot \dots \cdot E_m = \prod_{j=1, m} E_j. \quad (22)$$

Якщо відмови елементів можна вважати взаємозалежними, то ймовірність відмови в такій системі буде такою:

$$P\{E\} = \prod_{j=1}^m P\{E_j\}. \quad (23)$$

На практиці застосування таких систем являється операцією резервування, яку застосовують, коли необхідно досягти високого ступеня надійності.

Оцінювання рівня ризику проводиться за класифікацією, приведеною у [12].

Для проведення кількісного аналізу небезпек з метою визначення ймовірності аварій та нещасних випадків, величини ризику, величини можливих наслідків запропоновано використати метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло використовується для моделювання процесів, на хід яких впливають випадкові чинники, а також дає можливість аналізувати та оцінювати різні «сценарії» реалізації рішень і враховувати різні чинники ризиків у межах одного підходу. Він базується на одержанні псевдо-випадкових чисел, які при вирішенні задач використовуються як випадкові [11]. Важливою перевагою цього методу є його простота, суть якої наступна:

для побудови моделі необхідно записати один цикл реалізації моделі, а потім повторити його визначену кількість разів, в залежності від точності розрахункової характеристики.

При використанні методу Монте-Карло ймовірність відмови елемента системи чи системи визначається за наступною залежністю:

$$P = \frac{N^*}{N}, \quad (24)$$

де N^* – кількість відмов елемента системи чи системи за час моделювання; N – загальна кількість ітерацій (повторень) алгоритму, в якому моделювалась робота системи.

Даний метод дає змогу звести більшу частину обчислень до простої залежності (24), що значно спрощує визначення ймовірності відмови обладнання.

6. Результати досліджень

6.1. Алгоритм визначення техногенного ризику та його програмна реалізація

В результаті проведених досліджень і опрацювань різноманітних теоретичних та практичних матеріалів було розроблено алгоритм для визначення техногенного ризику об'єктів хімічної промисловості та об'єктів інших видів виробництва (рис. 2).

З метою полегшення прийняття рішень щодо умов експлуатації промислового об'єкту та його стану шляхом оцінювання техногенного ризику розроблено програмний комплекс «РИСК 1.2» [13] на основі теорії надійності із поєднанням моделювання роботи системи методом Монте-Карло. Розроблений програмний комплекс включає в себе елементи баз даних, які дозволяють проаналізувати рівні техногенного ризику при використанні тих чи інших способів з'єднання елементів системи, а також при використанні різних складових елементів. А також оцінити зміни надійності системи при використанні інших складових елементів.

Роботу програми доцільно представити на прикладі системи, складовими елементами якої є підігрівачі ПВТ1-7 (Україна) в технологічній системі ТЕЦ (теплова електростанція) [14].

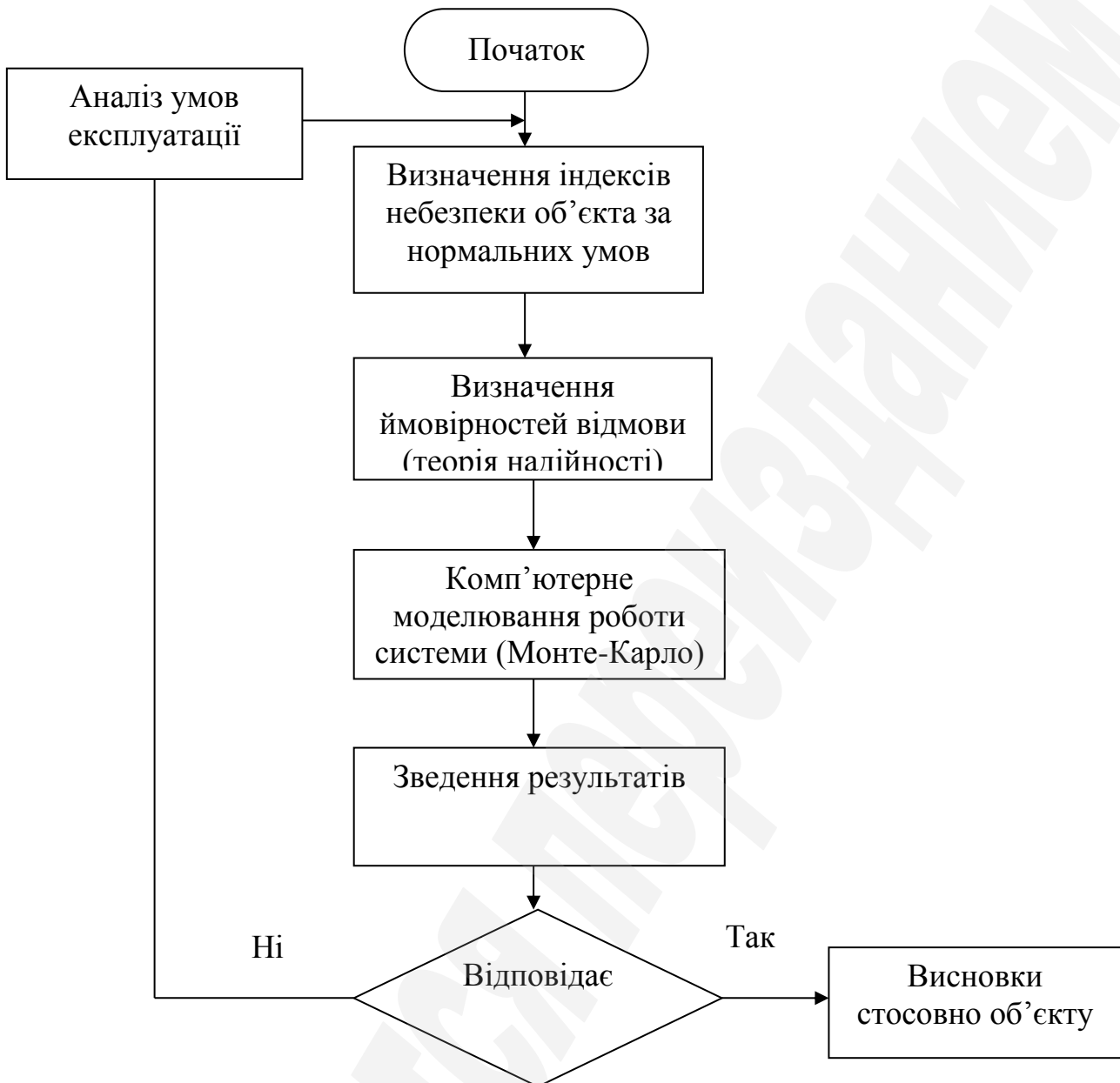


Рис. 2. Узагальнений алгоритм визначення техногенного ризику промислового об'єкта при експлуатації

Після проведемо розрахунок (рис. 3). Розрахована імовірність відмови системи дорівнює $P_{\text{відмови}} = 4,6 \cdot 10^{-5}$. Ймовірність відмови усіх елементів системи $P_{\text{повної відмови}} = 8 \cdot 10^{-38}$.

Як бачимо з рис. 3–5, проводити розрахунки ризиків відмови технологічного обладнання з використанням розробленого програмного комплексу досить просто. Слід відмітити, що можливість використання методів теорії надійності й методів комп'ютерного моделювання є великою перевагою, адже окрім проведення розрахунків тим чи іншим методом, завжди можна провести перевірку отриманих результатів.

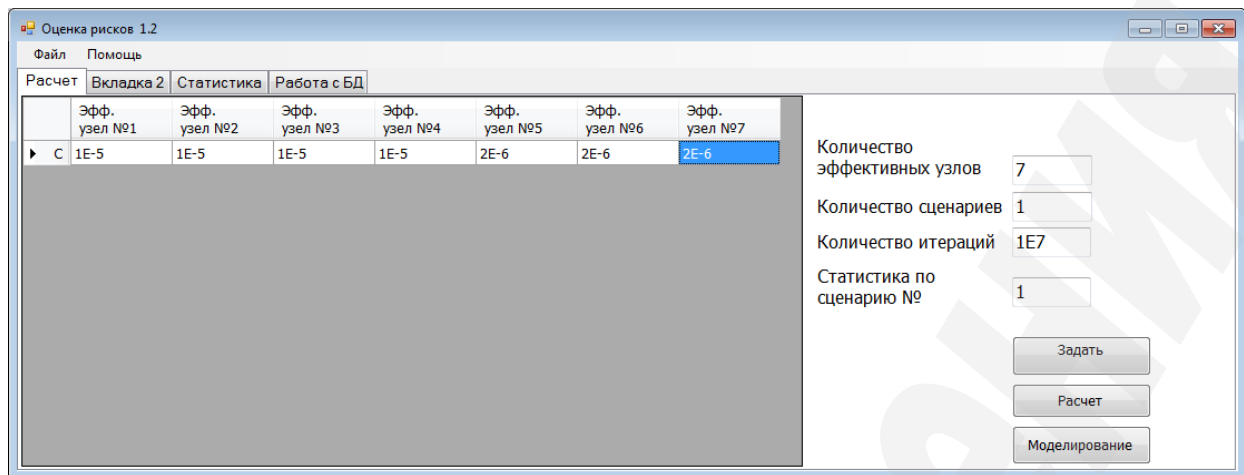


Рис. 3. Вікно введення початкових даних

Результати представлені на рис. 4.

	Р отказа Эфф. узел №1-	Р отказа Эфф. узел №1-2-	Р отказа Эфф. узел №1-2-3-	Р отказа Эфф. узел №1-2-3-4-	Р отказа Эфф. узел №1-2-3-4-5-	Р отказа Эфф. узел №1-2-3-4-5-6-	Р отказа Эфф. узел №1-2-3-4-5-6-7	Р отказа СИСТЕМЫ с последовательным соединением=	Р отказа СИСТЕМЫ с параллельным соединением
▶	1E-05	1E-10	1E-15	1E-20	2E-26	4E-32	8E-38	4,5999148007736E-05	8E-38

Рис. 4. Розрахунок імовірності відмови системи

Проведемо уточнення ймовірностей відмови системи та її елементів за допомогою методів математичного моделювання, а саме методу Монте-Карло (рис. 5).

	Количество итераций	Количество отказов	Количество простоев
▶ Эфф. узел №1	10000000	100	0
Эфф. узел №2	10000000	109	100
Эфф. узел №3	10000000	98	209
Эфф. узел №4	10000000	100	307
Эфф. узел №5	10000000	15	407
Эфф. узел №6	10000000	21	422
Эфф. узел №7	10000000	27	443

Рис. 5. Результаты моделирования работы элементов сложной технологической системы

6.2. Апробація розробленої методики оцінювання техногенного ризику системи водопідігрівачів теплової електростанції

При оцінюванні можливих ризиків роботи складного виробництва використовується математичний метод, який включає побудову графа, що характеризує зв'язки між ситуаціями та факторами ризику. На підставі цього методу був визначений сценарій розвитку небажаних ситуацій в системі, що

складається з семи водонагрівачів, входить до технологічної системи ТЕЦ [14]. Зокрема розглянуто сценарій, в якому розглядається можливість відмови одного з семи паралельно з'єднаних водонагрівачів. З точки зору теорії надійності, вони розглядаються як система послідовно з'єднаних елементів, тому що відмова одного водонагрівача призводить до неможливості підігріву води в необхідній кількості, наслідком чого є відмова системи в цілому.

Граф, що описує систему нагрівачів, представлений на рис. 6, має таку структуру, оскільки вона найбільш точно описує характер взаємодії її елементів. При побудові графа в системі OpenFTA було вирішено розділити елементи системи на дві гілки: 3 функціональних елементи в першій та 4 в другій. Даний поділ передбачає облік відмінностей між нагрівачами (в системі використовуються 4 нагрівача низького тиску та 3 – високого).

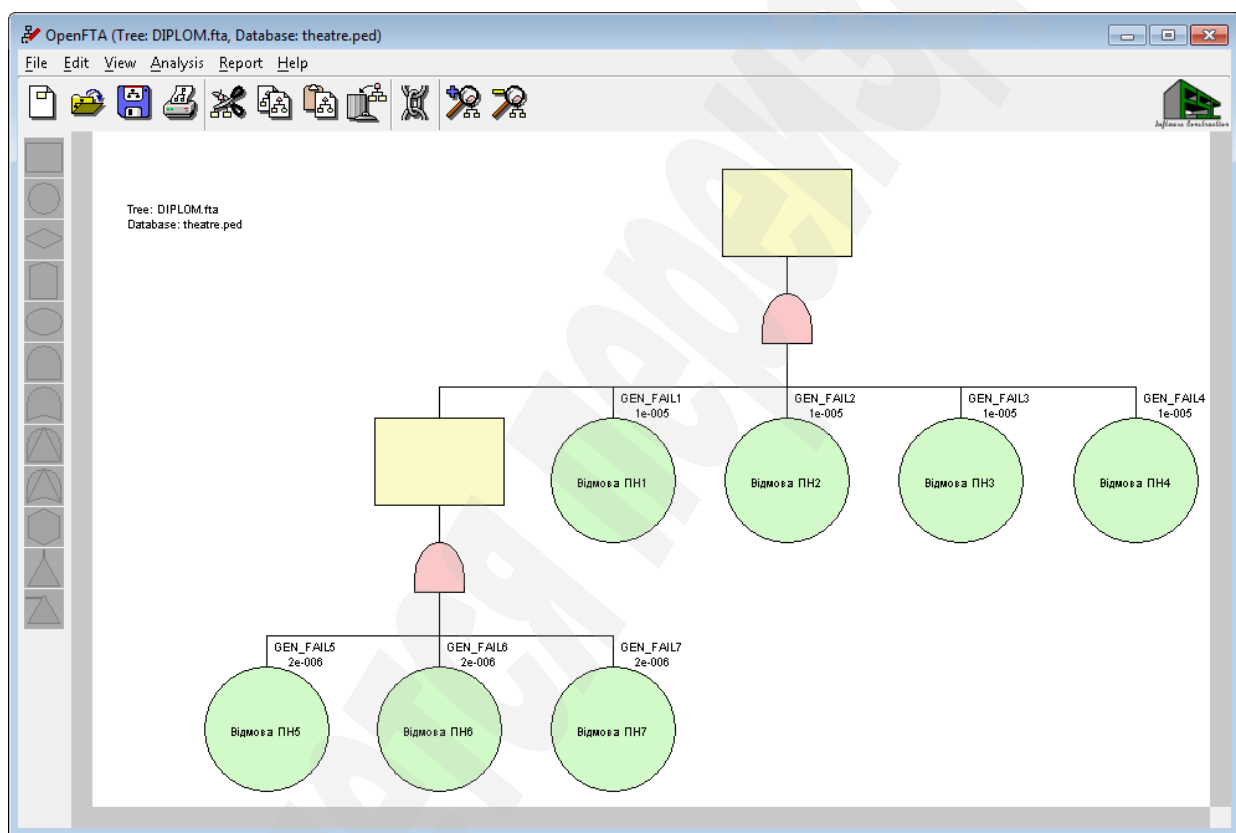


Рис. 6. Дерево відмов для системи з семи водонагрівачів теплової електростанції побудоване в середовищі OpenFTA

При реалізації розробленого алгоритму були прийняті такі припущення:

- 1) номінальні ймовірності відмови елементів системи отримані, виходячи з індексних оцінок, розрахованих раніше;
- 2) граф зв'язків між ситуацією, яка може привести до відмови обладнання та факторами ризику, представляється у вигляді сценарію.

Методи імітаційного моделювання були використані для уточнення ймовірності відмови елементів складної системи та для розрахунку техногенного ризику системи в цілому. Докладніше в роботах [14–16]. Вже згадана система складається з 4 типів водонагрівачів, які відрізняються своїми технічними характеристиками: гідравлічним опором, поверхнею нагрівання (від 350 м² до 700

м²), максимальною температурою пара (від 341 °С до 449 °С), вагою (від 10,4 т до 63, 5 т). Необхідні для проведення розрахунків вихідні дані представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для кількісної оцінки техногенного ризику

Нагрівач	Тип	Номінальна ймовірність відмови
Нагрівач низького тиску № 1	ПН-350-16-7-III нж	$1 \cdot 10^{-5}$
Нагрівач низького тиску № 2	ПН-350-16-7-III нж	$1 \cdot 10^{-5}$
Нагрівач низького тиску № 3	ПН-350-16-7-III нж	$1 \cdot 10^{-5}$
Нагрівач низького тиску № 4	ПН-350-16-7-I нж	$1 \cdot 10^{-5}$
Нагрівач високого тиску № 1	ПВ-700-265-13	$2 \cdot 10^{-6}$
Нагрівач високого тиску № 2	ПВ-700-265-31	$2 \cdot 10^{-6}$
Нагрівач високого тиску № 3	ПВ-700-265-45	$2 \cdot 10^{-6}$

Проводилось зіставлення отриманих результатів із використанням індексних оцінок [17] і запропонованим авторами алгоритмом із використанням методу Монте-Карло для системи семіефективних вузлів (водонагрівачів) в технологічній системі ТЕЦ. Перший сценарій використовує в якості вихідних даних ймовірності відмови обладнання, розраховані раніше індексним методом [17]. Другий сценарій використовує значення ймовірностей, отримані для кожного окремого нагрівача методом Монте-Карло та становлять, відповідно для нагрівачів $1 \cdot 10^{-5}$, $1.09 \cdot 10^{-5}$, $0.98 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-5}$, $1.5 \cdot 10^{-6}$, $2.1 \cdot 10^{-6}$, $2.7 \cdot 10^{-6}$.

На першому етапі проводиться розрахунок ймовірності відмов одного, двох, трьох і т. д. та всіх нагрівачів одночасно. Також проводиться розрахунок ймовірності відмови всієї системи (до нього призводить відмова хоча б одного з працюючих елементів). Ймовірність відмови системи в цілому включає себе ймовірність того, що відмовить одночасно кілька нагрівачів в будь-якій їх комбінації (перший та другий, п'ятий та шостий, або одночасно все). При використанні методу імітаційного моделювання проводилася серія випробувань з 10^8 ітерацій для отримання ймовірності відмови обладнання в режимі нормальної експлуатації. Уявімо отримані результати розрахунку різними методами та їх порівняння представлені у вигляді стовпчастих діаграм на рис. 7. Похибка становить 2 %.

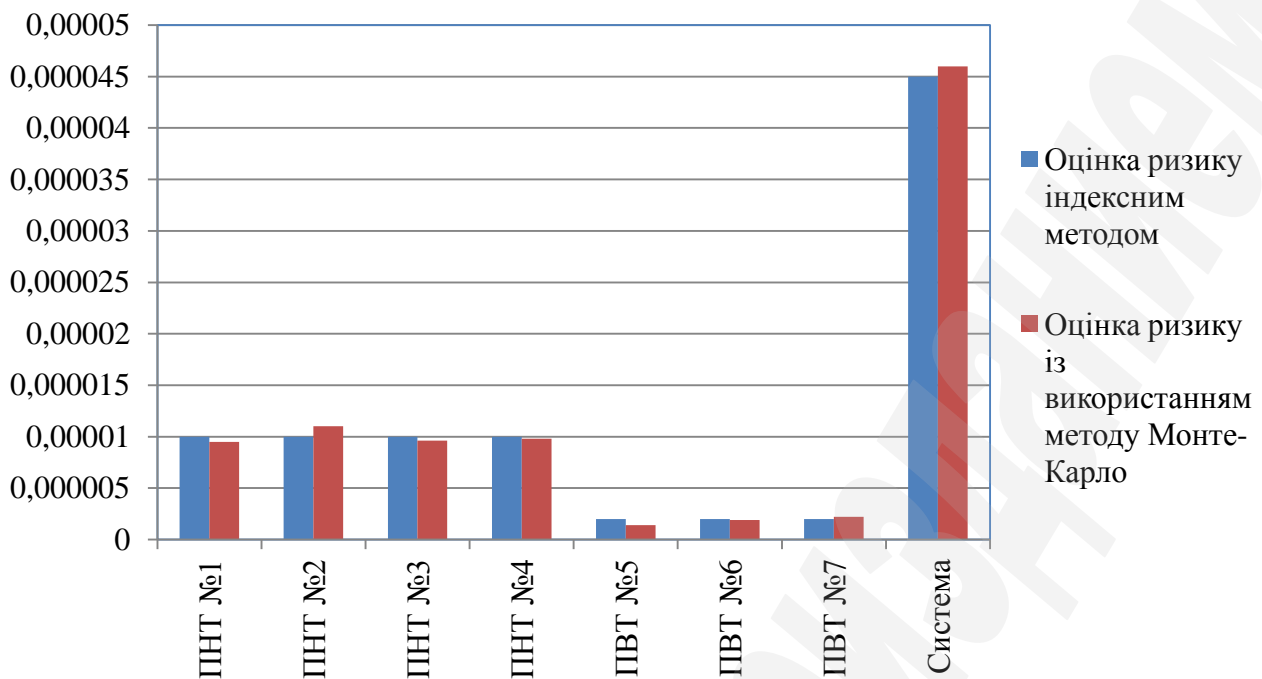


Рис. 7. Результати реалізації алгоритму, заснованого на спільному застосуванні індексних оцінок і методу Монте-Карло, для системи з семи водонагрівачів теплової електростанції

Система знаходиться на границі неприйнятної та умовно-прийнятної рівнів небезпеки, що дає підстави для необхідності вжиття заходів по збільшенню надійності системи:

- або шляхом збільшення кількості резервних елементів системи;
- або за допомогою поліпшення їх якості (установка більш надійних нагрівачів).

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. У порівнянні з існуючими методами оцінки техногенної безпеки промислових підприємств розроблений алгоритм надає можливість прогнозування техногенного ризику при нормальному режимі експлуатації із застосуванням індексного підходу та методу імітаційного моделювання. Це дозволяє враховувати фактичні показники роботи підприємства і, відповідно, отримати значення техногенного ризику для реальних умов функціонування, а значить обґрунтовано здійснювати керування виробничим процесом.

Weaknesses. До слабких сторін слід віднести вимоги обмеження щодо складності структурних схем об'єктів і, відповідно, можливість застосовувати для великих підприємств розподіл на функціональні блоки.

Opportunities. Рівень техногенного ризику безпосередньо залежить від діяльності людини. Впровадження нових технологій спричиняє за собою збільшення не лише рівня якості життя, але і рівня можливих техногенних небезпек. Оскільки у світі існує величезна кількість діючих технологічних виробництв, оцінка техногенних ризиків в часі стає дуже важливим аспектом роботи цих підприємств, саме тому, що така оцінка може давати коректні результати в прогнозуванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Threats. Для застосування розробленого програмного комплексу достатньо володіти навичками роботи з комп'ютерними програмами, а для підготовки вихідних даних та аналізу отриманих результатів потрібно володіти основами теорій техногенних ризиків та надійності.

8. Висновки

1. Розроблено алгоритм визначення техногенного ризику промислового об'єкта на основі теорії надійності. Цей алгоритм спрощує процедуру прийняття рішень щодо досліджуваного об'єкта. Особливість запропонованого алгоритму полягає у прогнозуванні техногенного ризику при нормальному режимі експлуатації об'єкту, використовуючи метод імітаційного моделювання. Використання даного методу дозволяє враховувати фактичні показники роботи та розрахувати значення техногенного ризику для реальних умов функціонування, а значить обґрунтовано здійснювати керування виробничим процесом.

2. Проведено апробацію розробленого програмного комплексу на прикладі системи водонагрівачів теплової електростанції. Розраховано ймовірності відмови системи та її елементів за допомогою методів математичного моделювання, а саме методу Монте-Карло. Розрахована ймовірність відмови системи дорівнює $p_{\text{відмови}}=4,6 \cdot 10^{-5}$. Ймовірність відмови усіх елементів системи $p_{\text{повної відмови}}=8 \cdot 10^{-38}$.

3 метою перевірки правильності отриманих результатів, проводилось зіставлення результатів отриманих із використанням індексних оцінок і запропонованим алгоритмом по методу Монте-Карло для системи семи ефективних вузлів в технологічній системі теплової електростанції. Похибка становить 2 %.

References

1. *Metodyka vyznachennia ryzykiv ta yikh pryiniatnykh rivniv dlia deklaruvannia bezpeky obiektiv pidvyshchenoi nebezpeky* (2002). Ministerstvo pratsi ta sotsialnoi polityky Ukrainy No. 637. 04.12.2002. Available at: https://zakononline.com.ua/documents/show/34982__34982

2. *Normatyvy porohovykh mas nebezpechnykh rechovyn dlia identyfikatsii obiektiv pidvyshchenoi nebezpeky* (2002). DNAOP 0.00-3.07-02. Kabinet Ministriv Ukrain No. 956. 11.07.2002. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-%D0%BF>

3. Vorobev, Iu. L. (2000). Natsionalnaia bezopasnost i upravlenie strategicheskimi riskami v Rossii. *Problemy bezopasnosti pri chrezvychnykh situatsiakh*, 5, 6–15.

4. Kuhta, A. I. (2019). Integrated method of occupational risk degree assessment at the enterprise. *Safety of technogenic and natural systems*, 1, 18–27. doi: <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-1-18-27>

5. Raj Pradeesh, T., Venkumar, P., Saravanamani, M. (2019). Hazard Identification using Risk Assesment for A Tyre Manufacturing Process. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9 (2S2), 353–356. doi: <http://doi.org/10.35940/ijitee.b1054.1292s219>

6. Fedosov, A. V., Badrtdinova, I. I., Abdrakhmanova, K. N., Velekhzhani, D. Y. (2019). Quantitative assessment of uncertainty of technogenic accidents risk analysis. *Oil and Gas Business*, 3, 46–66. doi: <http://doi.org/10.17122/ogbus-2019-3-46-66>

7. Quin, S., Widera, G. E. O. (1996). Uncertainty Analysis in Quantitative Risk Assessment. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 118 (1), 121–124. doi: <http://doi.org/10.1115/1.2842154>
8. Grigorev, V. S. et. al. (1990). Nekotorye aspekty lokalizatsii i likvidatsii avariinykh vybrosov toksichnykh veshchestv. *Vesnik vsesoiuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*, 4 (35), 463–468.
9. Beati, J., Caira, M. (2004). *Benchmarkon Dynamic Reliability An Approach based on Dynamic Event Tree Analysis*. University of Rome “La Sapienza”.
10. Smolich, S. V., Smolich, K. S. (2004). *Reshenie gorno-geologicheskikh zadach metodom Monte-Karlo*. Chita: ChiTGU, 103.
11. Alymov, V. T., Tarasova, N. P. (2006). *Tekhnogennyi risk: Analiz i otsenka*. Moscow: Akademkniga, IKTS, 118.
12. Boiko, T. V., Vavulin, P. A. (2014). Calculation and analysis of predictable technological risk value of industrial objects in stationary operating conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (71)), 42–47. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27981>
13. Boiko, T. V., Abramova, A. O., Vavulin, P. A. (2018). A. s. No. 75863 UA. *Programnii kompleks RISK 1.2*. published: 12.01.2018.
14. *Publichne aktsionerne tovarystvo «Kharkivska TETs-5»*. Available at: <http://www.tec5.kharkov.ua/>
15. Vavulin, P. A., Boiko, T. V. (2016). Analysis of algorithm for estimating distribution functions of random variables for the prediction of technogenic risk. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (3 (28)), 17–23. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.66754>
16. Boiko, T. V., Baturynska, I. R. (2013). Definition man-caused risks based on the monte-carlo method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (62)), 4–7. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/11721>
17. Bendiuh, V. I. (2005). *Systema otsinky tekhnohennoi bezpeky promyslovykh pidpriemstv: metodolohiia ta alhorytm rozrakhunku*. Kyiv, 193.

The object of research is the industrial risk of an industrial facility. One of the most problematic places is the uncertainty of the initial information regarding the object of study and the lack of a universal methodology that would allow an assessment of technological risks at all stages of the operation of an industrial object. A particularly acute problem concerns potentially hazardous industries.

The analysis of existing methods and approaches to assessing the technological risks of industrial facilities at different stages of their functioning is carried out. It is established that one of the best methods is the Monte Carlo method, which allows to quantify the uncertainty of decisions. The use of the Monte Carlo method for quantitative hazard analysis in order to determine the probability of accidents and accidents, the magnitude of the risk, the magnitude of the possible consequences is justified.

The elements of the theory of reliability for the quantitative assessment of risks are used. A quantitative hazard analysis in accordance with the theory of reliability makes it possible to determine the probability of accidents and accidents, the

magnitude of the risk, the magnitude of the possible consequences. Probability methods and statistical analysis are integral parts of the quantitative analysis of hazards and technological risk.

An algorithm is developed to determine the industrial risk of an industrial facility using the theory of reliability. A software package is developed based on the theory of reliability with a combination of Monte Carlo simulation of the system. The developed software package allows to analyze the level of technogenic risk when using various methods of connecting elements of the system, as well as evaluate changes in the reliability of the system when using other components. The program is presented on the example of a system, the components of which are the heaters PVT1-7 (Ukraine) in the technological system of a thermal power plant. The system under study is at the border of an unacceptable and conditionally acceptable level of danger, which gives grounds for the need to take measures to increase the reliability of the system by increasing the number of backup system elements, or improving their quality.

Keywords: *technological risk, Monte Carlo method, reliability theory, software package, system reliability.*