УДК 004.056.5 Doi: https://doi.org/10.32918/nrs.2022.1(93).05

Метод агрегування ризиків у разі множини сумісних випадкових подій

■ **Гончар Сергій Феодосійович,** д-р техн. наук
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9978-8998

■ **Бакалинський Олександр Олегович,** канд. техн. наук
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, м. Київ, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9712-2036

■ **Дибач Олексій Михайлович,** канд. техн. наук
ВП «Центр «ІНТЕНСА» Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Славутич, Україна
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-1807-8514

■ **Дімітрієва Дар'я Олександрівна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9029-0456

У статті описано аналіз методів агрегування ризиків, наводяться випадки, в яких агрегований ризик визначається арифметичною сумою ризиків. Показано, що визначення агрегованого ризику, спричиненого сумісними випадковими подіями, є актуальною задачею під час визначення ймовірності сукупних втрат за заданий час, які можуть виникнути внаслідок сукупності цих подій, а проблема агрегування ризиків також є актуальною та досліджується для об'єктів атомної енергетики. Показано, що зараз не існує верифікованих методик та методів агрегування ризиків. Запропоновано метод агрегування ризиків, спричинених множиною сумісних випадкових подій, що дозволяє визначати ймовірність сукупних втрат за заданий час, які можуть виникнути внаслідок сукупності цих подій, визначити мінімальне значення ймовірності повного знищення активу та мінімальні збитки, які достовірно матимуть місце. Розглядається метод агрегування на прикладі двох і трьох ризиків, а також визначається агрегований ризик у разі N ризиків. Показано, що отримані результати визначення агрегованого ризику дозволяють визначити мінімальне значення ймовірності повного знищення активу та мінімальні збитки, які достовірно матимуть місце, порівняти агрегований ризик з допустимим ризиком з метою застосування відповідних варіантів обробки ризику, порівняти можливі збитки з допустимими збитками з метою застосування відповідних заходів зі зменшення можливих збитків.

Ключові слова: ризик, агрегування ризиків, випадкові події, актив, збитки, ймовірність.

© Гончар С. Ф., Бакалинський О. О., Дибач О. М., Дімітрієва Д. О., 2022

Вступ

Переважно ризики є наслідками множини сумісних випадкових подій як взаємонезалежних, так і взаємозалежних. Ймовірність можливих сукупних втрат за заданий час, що можуть виникнути внаслідок сукупності цих випадкових подій, деякі дослідники називають агрегованим ризиком [1].

Актуальність

Аналіз досліджень показує [1]-[11], що у разі множини ризиків агрегований ризик може бути визначений адитивно або мультиплікативно. Здебільшого дослідники пропонують визначати агрегований ризик адитивно. Так, у роботах [2]-[7], [9], [10] агрегований ризик, у разі незалежних

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

небезпечних подій, пропонується подати арифметичною сумою ризиків:

$$R_{агр} = \sum_i R_i . \quad (1)$$

Водночас, автори пропонують визначати агрегований ризик арифметичною сумою ризиків у таких випадках:

ризики є наслідками несумісних випадкових подій, які мають різну частоту появи і тривалість існування [12];

кожний з множини ризиків спрямований на окремий об'єкт [2], [3];

ризики діють не одночасно, а агрегований ризик визначається за певний проміжок часу [6].

Як показано у [12], арифметичне додавання ризиків є найпростішим способом їх агрегування, але, на думку автора статті [12], за таких умов агрегований ризик буде переоцінений. Автор зазначає, що більш точний підхід повинен використовувати відповідні формули, які містять коефіцієнти кореляції. Так, наприклад, у дослідженні [13] визначення агрегованого ризику двох ризиків R_1, R_2, пропонується здійснювати з використанням коефіцієнта кореляції у вигляді добутку цих ризиків:

$$R_{агр}=R_1+R_2-R_1 \cdot R_2. \quad (2)$$

Дослідження показують [5], що нині не існує верифікованих методик та методів агрегування ризиків, а визначення агрегованого ризику, спричиненого сумісними випадковими подіями, є актуальною задачею під час визначення ймовірності сукупних втрат за заданий час, що можуть виникнути внаслідок сукупності цих подій. Але питання про найкращий метод агрегування ризиків залишається відкритим.

Зауважимо, що проблема агрегування ризиків також є актуальною та досліджується для об'єктів атомної енергетики [14]. Агрегований ризик щодо майданчика розміщення ядерної установки формується сукупністю вихідних подій (внутрішні ініціатори, внутрішні та зовнішні події та екстремальні впливи), експлуатаційних станів ядерної установки, за яких можуть виникнути вихідні події, та об'єктів, які зазнають впливу на цьому майданчику.

Результати досліджень

У цій статті пропонується метод агрегування ризиків, спричиненого множиною сумісних випадкових подій.

У роботах [1], [6] ризик від небезпечної події пропонується оцінювати за такою формулою:

$$R=h \cdot p, \quad (3)$$

де p – мовірність настання небезпечної події;

h – можливі збитки від небезпечної події.

На підставі виразу (3) залежність наслідків h в результаті настання деякої події від її ймовірності p можна представити у вигляді функції:

$$h=f(R,p). \quad (4)$$

Графік функції (3) наведено на рисунку 1.

Графік проєкції функції ризику на площину ph (рисунок 2) можна представити у вигляді виразу:

$$h(p)=\frac{R_0}{p}, \quad (5)$$

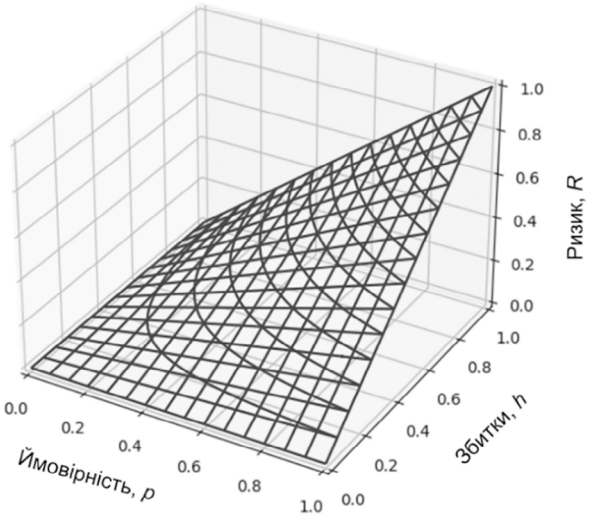


Рисунок 1 – Графік залежності збитків від їх \ ймовірностей та величини ризику

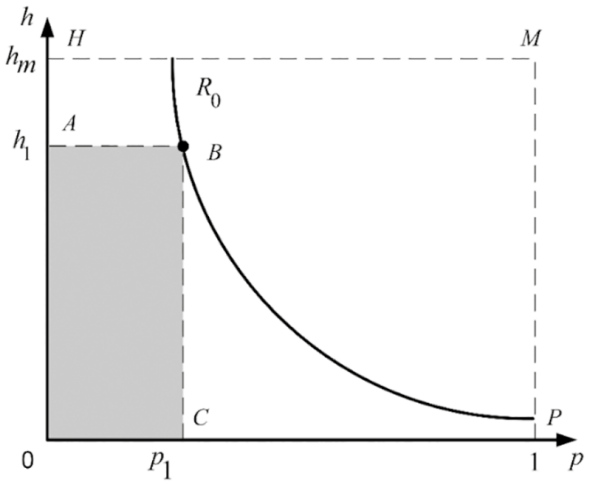


Рисунок 2 – Графік проєкції функції ризику на площину ph

де R_0– значення ризику, на рівні якого здійснюється переріз графіка функції (4); $p \neq 0$.

На підставі виразу (3), ризик R_0 кількісно визначається як добуток ймовірності p_1 випадкової події, що призводить до певних збитків, та величини цих збитків h_1, і геометрично буде дорівнювати площі чотирикутника OABC, (рисунок 2):

$$R_0 = S_{OABC} = p_1 \cdot h_1. \quad (6)$$

На підставі виразу (3) максимальний ризик для активу буде визначатися як:

$$R_m = p_m \cdot h_m = h_m, \quad (7)$$

де p_m – максимальна ймовірність випадкової події, $p_m = 1$;

h_m – максимальні збитки для активу, тобто, наслідки, які призводять до повного знищення активу.

На підставі виразу (7), максимальний ризик для активу R_m визначається, як достовірна подія, яка призводить до повного знищення активу, і геометрично буде дорівнювати площі чотирикутника OHMP (рисунок 2).

Очевидно, що в умовах декількох ризиків R_i на актив, агрегований ризик R не буде перевищувати максимальний ризик R_m і, тому, не може визначатися як алгебраїчна сума усіх ризиків R_i.

Розглянемо на прикладі двох ризиків R_1 і R_2, представлених відповідними графіками, які визначаються значеннями ймовірностей p_1, p_2 та наслідків h_1, h_2:

$$R_1 = p_1 \cdot h_1 \text{ і } R_2 = p_2 \cdot h_2. \quad (8)$$

Причому можливі три варіанти взаємного розміщення графіків ризиків R_1 і R_2 на площині *ph*:

1) ризики R_1 і R_2 частково перекриваються (рисунок 3а);

2) один із ризиків, наприклад R_1, повністю перекривається іншим ризиком R_2 (рисунок 3б);

3) ризики R_1 і R_2 ідентичні ($h_1 = h_2$ і $p_1 = p_2$) (рисунок 3в).

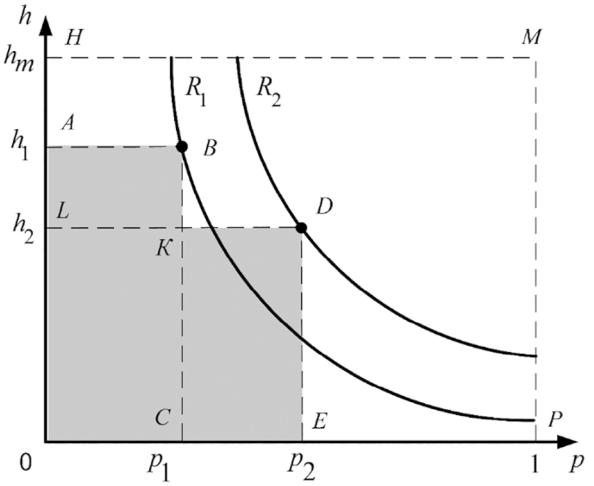
Розглянемо кожний із наведених варіантів взаємного розміщення графіків ризиків R_1 і R_2 на площині *ph* більш детально.

У першому варіанті (рисунок 3а) значення ризиків R_1 і R_2 кількісно будуть дорівнювати площам чотирикутників OABC і OLDE, відповідно.

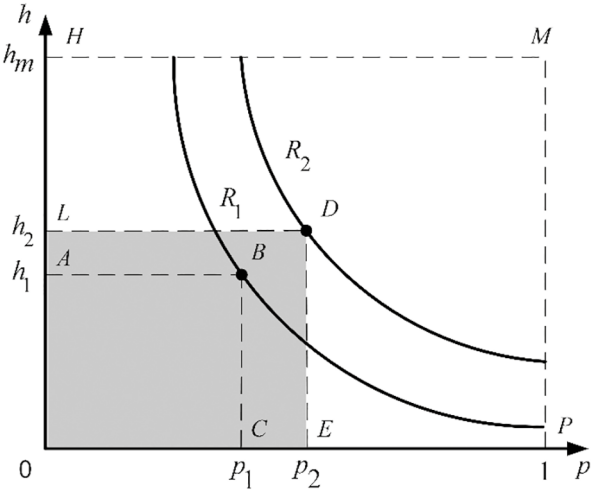
У такому разі, значення агрегованого ризику R може бути визначено як площа фігури OABKDE (рисунок 3а).

Враховуючи вирази (8) та рисунок 3а, агрегований ризик R можна визначити з такого виразу:

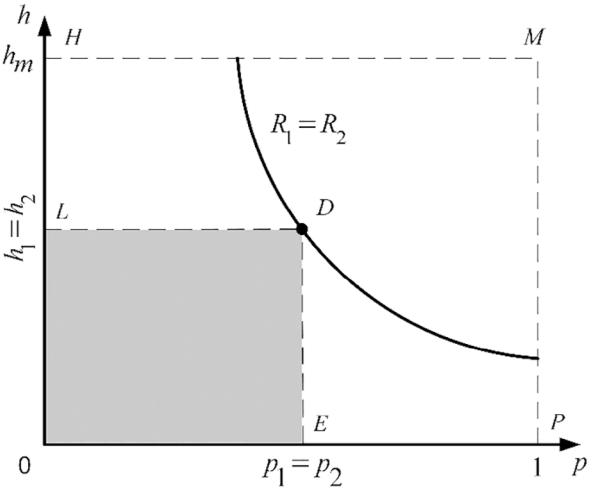
$$R = p_1 \cdot h_1 + p_2 \cdot h_2 - p_1 \cdot h_2 = R_1 + R_2 - p_1 \cdot h_2. \quad (9)$$



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Варіанти взаємного розміщення графіків ризиків R_1 і R_2 на площині *ph*

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

У другому варіанті (рисунок 3б) значення ризиків R_1 і R_2 кількісно будуть дорівнювати площам чотирикутників OABC і OLDE, відповідно.

У такому разі, значення агрегованого ризику R може бути визначено як площа фігури OLDE (рисунок 3б).

Враховуючи вирази (8) та рисунок 3б агрегований ризик R можна визначити з такого виразу:

$$R=p_1\cdot h_1+p_2\cdot h_2-p_1\cdot h_2=R_2. \quad (10)$$

У третьому варіанті (рисунок 3в) значення кожного із ризиків R_1 і R_2 кількісно будуть дорівнювати площі чотирикутника OLDE.

Враховуючи вирази (8) та рисунок 3в агрегований ризик R можна визначити з такого виразу:

$$R=p_1\cdot h_1=p_2\cdot h_2=R_1=R_2. \quad (11)$$

Аналогічно можна визначити агрегований ризик у разі N ризиків:

$$R=\sum_{i=1}^{N}h_i\cdot p_i-\sum_{j=2}^{N}\left\{\left[\min(h_j,h_{j-1})\right]\cdot\left[\min(p_j,p_{j-1})\right]\right\}=$$
$$=\sum_{i=1}^{N}R_i-\sum_{j=2}^{N}\left\{\left[\min(h_j,h_{j-1})\right]\cdot\left[\min(p_j,p_{j-1})\right]\right\}. \quad (12)$$

Використовуючи вираз агрегованого ризику (12) розглянемо можливі варіанти взаємного розміщення графіків трьох ризиків R_1, R_2 і R_3 на площині ph:

1) ризики R_1, R_2 і R_3 частково перекриваються (рисунок 4а);

2) один із ризиків, наприклад R_1, повністю перекривається іншими ризиками R_2 і R_3, які частково перекриваються між собою (рисунок 4б);

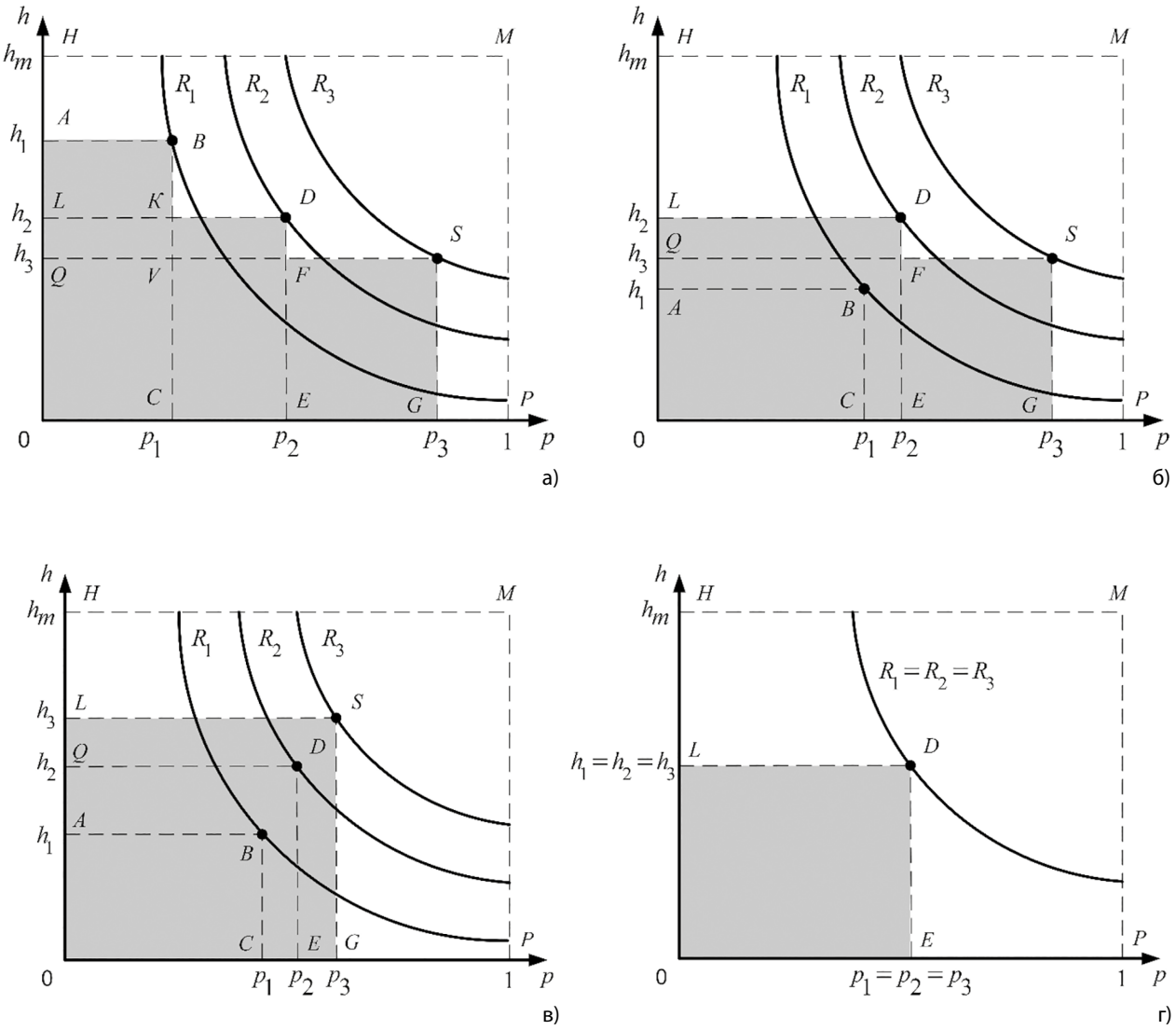


Рисунок 4 – Варіанти взаємного розміщення графіків ризиків R_1, R_2 і R_3 на площині ph

3) один із ризиків, наприклад R_1, повністю перекривається ризиком R_2, який, зі свого боку, повністю перекривається R_3 (рисунок 4в);

4) ризики R_1, R_2 і R_3 ідентичні ($h_1=h_2=h_3$ і $p_1=p_2=p_3$) (рисунок 4г).

Розглянемо кожний із зазначених варіантів взаємного розміщення графіків трьох ризиків R_1, R_2 і R_3 на площині *ph* більш детально.

У першому варіанті (рисунок 4а) значення агрегованого ризику *R* може бути визначено, як площа фігури OABKDFSG.

Враховуючи вирази (12) та рисунок 4а, агрегований ризик *R* можна визначити з такого виразу:

$$R=p_1\cdot h_1+p_2\cdot h_2+p_3\cdot h_3-h_2\cdot p_1-h_3\cdot p_2= \\ =R_1+R_2+R_3-h_2\cdot p_1-h_3\cdot p_2. \quad (13)$$

У другому варіанті (рисунок 4б) значення агрегованого ризику *R* може бути визначено як площа фігури OLDFSG.

Враховуючи вирази (12) та рисунок 4б, агрегований ризик *R* можна визначити з такого виразу:

$$R=p_1\cdot h_1+p_2\cdot h_2+p_3\cdot h_3-h_1\cdot p_1-h_3\cdot p_2= \\ =R_2+R_3-h_3\cdot p_2. \quad (14)$$

У третьому варіанті (рисунок 4в), значення агрегованого ризику *R* може бути визначено як площа фігури OLSG.

Враховуючи вирази (12) та рисунок 4в, агрегований ризик *R* можна визначити з такого виразу:

$$R=p_1\cdot h_1+p_2\cdot h_2+p_3\cdot h_3-h_1\cdot p_1-h_2\cdot p_2=p_3\cdot h_3=R_3. \quad (15)$$

У четвертому варіанті (рисунок 4г) значення агрегованого ризику *R* може бути визначено як площа фігури OLDE.

Враховуючи вирази (12) та рисунок 4г, агрегований ризик *R* можна визначити з такого виразу:

$$R=p_1\cdot h_1+p_2\cdot h_2+p_3\cdot h_3-h_1\cdot p_1-h_2\cdot p_2=p_3\cdot h_3=R_3. \quad (16)$$

Побудуємо графік залежності сукупних наслідків *h*, які можуть виникнути внаслідок сукупності випадкових подій, від ймовірності сукупності цих подій *p*.

Використовуючи значення агрегованого ризику *R*, отриманого з виразу (12) для випадку *N* ризиків, і задаючи значення ймовірності *p* у діапазоні від 0 до 1, будуємо графік функції:

$$h(p)=\frac{R}{p}, \quad (17)$$

де $p\neq 0$.

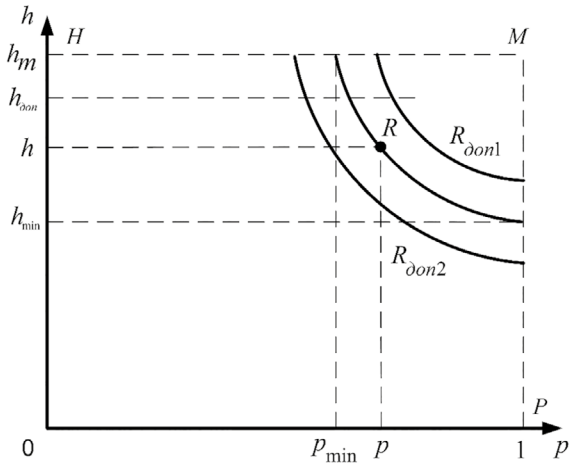


Рисунок 5 – Графік функції (17)

Графік функції (17) наведено на рисунку 5.

Для значення агрегованого ризику *R*, визначеного з виразу (12), для заданого значення ймовірності *p* знаходимо величину наслідків (збитків) *h*, як ординату точки *R*, і для заданого значення наслідків (збитків) *h* знаходимо ймовірність *p*, як абсцису точки *R* (рисунок 5).

Отримані результати визначення агрегованого ризику *R* (рисунок 5) дозволяють:

визначити мінімальне значення ймовірності p_{min} повного знищення активу, як абсцису точки перетину графіка функції $h=f(R,p)$ з лінією $h=h_m$;

визначити мінімальні збитки h_{min}, які достовірно матимуть місце, як ординату точки перетину графіка функції $h=f(R,p)$ з лінією $p=1$;

порівняти агрегований ризик *R* з допустимим ризиком з метою застосування відповідних варіантів обробки ризику, при тому $R<R_{доп1}$, $R>R_{доп2}$;

порівняти можливі збитки *h* з допустимими збитками $h_{доп}$, з метою застосування відповідних заходів зі зменшення можливих збитків.

Висновки

Отже, у цій статті запропоновано метод агрегування ризиків, спричиненого множиною сумісних випадкових подій, що дозволяє визначати ймовірність сукупних втрат за заданий час, що можуть виникнути внаслідок сукупності цих подій, визначити мінімальне значення ймовірності повного знищення активу та мінімальні збитки, які достовірно матимуть місце.

Список використаної літератури

1. Орлов А. И., Цисарский А. Д. Метод оценки рисков при создании ракетно-космической техники. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2017. № 2. С. 99-107.

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

2. Kubayev U. R., Azamov T. N. Models of Information Security of The System of Small And Medium Business. *Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent*. 2018. Vol. 8. Iss.1, Article 3.

3. Мурзин А. Д. Принципы моделирования принятия решений по управлению социо-эколого-экономическими рисками развития городских территорий. *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 3(21). С. 626-629.

4. Алексеев И. Н., Терехов А. Л. Механизм управления рисками деятельности инжиниринговых организаций. *Охрана труда и промышленная безопасность*. 2019. № 3. С. 62-70.

5. Гамукин В. В. Бюджетные риски: среда, система, случай: монография. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2015. 328 с.

6. Ильюшонок А. В. Оценка индивидуального риска от наиболее распространенных потенциально опасных объектов. *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. 2008. № 2(8). С. 36-40.

7. Гончарова Е. Б., Карташов Б. А. К вопросу об оценке риска в инновационной деятельности предприятий. *Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции*. Камышин, 2014. С. 131-133.

8. Мохор В.., Бакалинський О., Цуркан В. Аналіз способів представлення оцінок ризиків інформаційної безпеки. *Information Technology and Security*. 2018. Vol. 6. Iss. 1, pp. 2411-1031.

9. Мохор В. В., Гончар С. Ф., Дибач О. М. Методи оцінки сумарного ризику кібербезпеки об'єктів критичної інфраструктури. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. № 2(82). С.57-61. doi: 10.32918/nrs.2019.2(82).01.

10. Мохор В. В., Гончар С. Ф. Оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем об'єктів критичної інфраструктури. *Електронне моделювання*. 2019. Т.41, № 6. С. 65-76.

11. Комаров М. Ю., Гончар С. Ф., Дімітрієва Д. О. Дослідження проблеми кіберживучості об'єктів критичної інформаційної інфраструктури. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 1(89). С.59-66. doi: 10.32918/nrs.2021.1(89).07.

12. Димитриади Г. Г. Введение в риск-менеджмент. Учебное пособие. Москва: Литрес, 2019. 85 с.

13. Плетминцев С. А. Технико-экономическое обоснование допустимой величины риска возникновения ДТП по дорожным условиям на существующих автомобильных дорогах. *Строительство и реконструкция*. 2011. № 3(35). С. 72-78.

14. Risk Aggregation for Nuclear Installations. IAEA TECDOC Series, IAEA-TECDOC-1983. Vienna: IAEA, 2021. 143 p.

References

1. Orlov, A., Tsisarsky, A. (2017). Method of risk assessment in the creation of rocket and space technology. *Bulletin of Bauman MSTU*. Engineering, 2, 99-107.

2. Kubayev U., Azamov, T. (2018). Models of information security of the system of small and medium business. *Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent*, 8(1), Article 3.

3. Murzin, A. (2012). Principles of decision-making modeling for the management of social, ecological and economic risks in the development of urban areas. *Engineering Bulletin of the Don*, 3 (21), 626-629.

4. Alekseev, I., Terekhov, A. (2019). The mechanism of risk management for the activities of engineering organizations. *Labor Protection and Industrial Safety*, 3, 62-70.

5. Gamukin, V. (2015). Budget risks: environment, system, case: monograph. Tiumen State University Press, 328 p.

6. Ilyushonok, A. (2008). Evaluation of individual risk from the most common potentially dangerous objects. *Bulletin of the Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergencies of the Republic of Belarus*, 2(8), 36-40.

7. Goncharova, Ye., Kartashov, B. (2014). On the issue of risk assessment in the innovative activities of enterprises. *Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference*, Kamyshyn, 131-133.

8. Mokhor, V., Bakalynskyi, O., Tsurkan, V. (2018). Analysis of information security risk assessment representation methods. *Information Technology and Technology*, 6(1), 2411-1031.

9. Mokhor, V., Honchar, S., Dybach, O. (2019). Methods for the total risk assessment of cybersecurity of critical infrastructure facilities. *Nuclear and Radiation Safety*, 2(82), 57-61. doi: 10.32918/nrs.2019.2(82).01

10. Mokhor, V., Honchar, S. (2019). Estimation of cybersecurity risks of information systems of critical infrastructure objects. *Electronic Modeling*, 41(6), 65-76.

11. Komarov, M., Honchar, F., Dimitriieva, D. (2021). Research of cyber survivability of critical information infrastructure objects. *Nuclear and Radiation Safety*, 1 (89), 59-66. doi: 10.32918/nrs.2021.1(89).07

12. Dimitriadi, G. (2019). Introduction to risk management. Tutorial. Moscow, Litres, 85 p.

13. Pletmintsev, S. (2011). Feasibility study of the acceptable risk of accidents on road conditions on existing roads. *Construction and Reconstruction*, 3(35), 72-78.

14. Risk aggregation for nuclear installations. IAEA TECDOC Series, IAEA-TECDOC-1983. Vienna, IAEA, 2021, 143 p.

Risk Aggregation Method for a Set of Compatible Random Events

S. Honchar[1], O. Bakalynskyi[1], O. Dybach[2], D. Dimitriieva[3]

[1]G. E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]Separated subdivision «Center Innovation in Nuclear Technology for the Safe future» State enterprise «State scientific and technical center for nuclear and radiation safety», Slavutych, Ukraine
[3]State enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

The article analyzes the methods of risk aggregation and presents cases in which the aggregate risk is determined by the arithmetic sum of risks. It is shown that the definition of the aggregate risk caused by compatible random events is an important task in determining the probability of total losses for a specified time, which may occur due to a combination of these events, and the problem of risk aggregation is also relevant and is being studied for nuclear power facilities. It is shown that there are currently no verified methodologies and methods of risk aggregation. A method of aggregating the risk caused by a set of compatible random events is proposed. This method allows determining the probability of total losses for a specified time that may occur due to a combination of these events and determining the minimum probability value of complete destruction of the asset and the minimum losses that will reliably occur. The aggregation method on the example of two and three risks is considered, and the aggregate risk in the case of N risks is determined. It is shown that the results of aggregate risk determination allow determining the minimum probability value of complete destruction of the asset and the minimum losses that will reliably occur, comparing the aggregate risk with tolerable risk in order to apply appropriate risk treatment options, and comparing possible losses with the allowable losses in order to apply appropriate measures to reduce possible losses.

Keywords: risk, aggregation of risks, random events, asset, losses, probability.

Отримано 07.10.2021

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ