МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

DOI: https://doi.org/10.15407/elmodel.48.05.003
УДК 004.056.53

О.О. Бакалинський, канд. техн. наук,
e-mail: baov@meta.ua; orcid: 0000-0001-9712-2036
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Олега Мудрака, 15

Концепція багатовимірного ризику безпеки соціотехнічних систем у моделюванні процесів виникнення системних загроз

Запропоновано концепцію багатовимірного ризику безпеки соціотехнічних систем як узагальнення класичної двокомпонентної моделі ризику. Показано, що збільшення кількості компонент ризику призводить до зростання розмірності ризикового простору та формування нових властивостей системи, які не можуть бути пояснені в межах традиційних адитивних підходів. Для опису взаємодії між компонентами ризику розроблено модель взаємозалежних ризиків та матрицю взаємозалежностей, що дозволяють формалізувати нелінійність процесів утворенняризиків. Обґрунтовано виникнення емерджентних властивостей і каскадних процесів як наслідку взаємодії між ризиками. Встановлено, що системний ризик формується в результаті розвитку багатокомпонентного ризику в умовах взаємозалежностей та не може бути представлений простою сумою локальних ризиків. Наукова новизна полягає у формалізації системного ризику як неадитивної властивості системи взаємодіючих ризиків. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час аналізу ризиків критичної інфраструктури, фінансового сектору, платіжних систем та інших складних соціотехнічних систем.

Ключові слова: багатовимірний ризик, системний ризик, взаємозалежності ризиків, емерджентність, каскадні процеси, соціотехнічні системи, критична інфраструктура, операційна стійкість.

Постановка проблеми. Ризик є однією з фундаментальних категорій управління складними системами та широко використовується під час прийняття рішень у сферах інформаційної безпеки, кібербезпеки, фінансової діяльності, управління критичною інфраструктурою та забезпечення операційної стійкості. Традиційно ризик розглядається як функція імовір-

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ності реалізації небажаної події та величини можливих збитків, що дозволяє отримати кількісну оцінку потенційної небезпеки та використовувати її для порівняння альтернативних сценаріїв [1—3]. Однією з найбільш поширених моделей є співвідношення:

$$R = pH, \tag{1}$$

де R — рівень ризику; p — імовірність реалізації події; H — величина можливого збитку.

Модель (1) використовується в багатьох міжнародних стандартах ризик-менеджменту та лежить в основі значної кількості методик оцінювання ризиків [1—3]. Її геометрична інтерпретація була досліджена в роботі [4], де ризик представлено як поверхню в просторі координат p, H, R, а множину станів із однаковим рівнем ризику — як сімейство гіпербол.

Разом з тим розвиток сучасних соціотехнічних систем суттєво змінив умови, в яких застосовуються класичні моделі ризику. У фінансовому секторі, електронних комунікаціях, платіжних системах та критичній інфраструктурі окремі компоненти системи перебувають у постійній взаємодії, формуючи складні мережі взаємозалежностей [5, 6].

У таких умовах наслідки реалізації ризику визначаються не лише величинами p та H, але й:

- структурою системи;
- характером взаємозв'язків між її елементами;
- можливістю поширення впливу;
- наявністю каскадних процесів;
- емерджентними властивостями системи.

У результаті ризик поступово перестає бути характеристикою окремої події та перетворюється на властивість складної взаємопов'язаної системи.

Особливої актуальності ця проблема набуває для фінансового сектору та критичної інфраструктури, де навіть локальні порушення можуть спричиняти масштабні системні наслідки [7—14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика ризику досліджується протягом тривалого часу та охоплює широкий спектр наукових напрямів. Класичні підходи до оцінювання ризику розглядаються в роботах з ризик-менеджменту та міжнародних стандартах [1—3, 15—19]. У цих роботах ризик здебільшого розглядається як функція обмеженої кількості параметрів та використовується для оцінювання окремих небажаних подій. Подальший розвиток досліджень привів до появи багатокомпонентних моделей ризику, у яких ризик почав розглядатися як функція більшої кількості факторів [15—19].

Окремий напрям наукових досліджень присвячений аналізу взаємозалежностей між елементами складних систем. Значний внесок у цей напрям зробили роботи [5—6]. Подальший розвиток цього напряму привів

до появи досліджень каскадних процесів та взаємопов'язаних мереж [20, 21], у яких було показано, що локальні порушення можуть поширюватися системою та породжувати масштабні наслідки. Паралельно з цим відбувалося формування концепції системного ризику [7—10], яка стала одним із центральних напрямів сучасних досліджень фінансової стабільності та операційної стійкості. Практичним продовженням цих досліджень стало формування концепції операційної стійкості, яка знайшла відображення в документах BCBS, FSB, EBA та Регламенті DORA [11—14].

Разом з тим проведений аналіз показує, що більшість сучасних досліджень або зосереджується на вдосконаленні моделей оцінювання ризику, або безпосередньо переходить до аналізу системного ризику та операційної стійкості. При цьому недостатньо дослідженим залишається математичний механізм переходу від класичного двокомпонентного ризику до системного ризику через багатовимірність, взаємозалежності та емерджентні властивості.

Метою роботи є дослідження математичних та геометричних наслідків переходу від двокомпонентної моделі ризику до багатокомпонентного представлення ризику, аналіз впливу взаємозалежностей між компонентами ризику на поведінку системи та обґрунтування механізму формування системного ризику в складних соціотехнічних системах.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати властивості класичної двокомпонентної моделі ризику;
- дослідити наслідки переходу до багатокомпонентного ризику;
- побудувати геометричну інтерпретацію багатовимірного ризику;
- формалізувати взаємозалежності між компонентами ризику;
- дослідити механізми виникнення емерджентних властивостей та каскадних процесів;
- обґрунтувати формування системного ризику;
- показати можливість практичного застосування отриманих результатів до складних соціотехнічних систем.

Наукова новизна роботи полягає у побудові цілісної математичної моделі формування системного ризику в складних соціотехнічних системах шляхом послідовного переходу від класичної двокомпонентної моделі ризику до багатовимірного ризику з урахуванням взаємозалежностей між його компонентами, виникнення емерджентних властивостей та розвитку каскадних процесів.

На відміну від існуючих підходів, у яких системний ризик переважно розглядається як результат агрегування або сукупного впливу окремих ризиків, у роботі системний ризик формалізовано як неадитивну властивість системи взаємодіючих ризиків, що виникає внаслідок структурних взаємо-

залежностей між компонентами ризику, формування емерджентних властивостей та каскадного поширення впливів у багатовимірному ризиковому просторі.

Уперше побудовано узагальнену концептуальну схему формування системного ризику у вигляді послідовності переходів: класичний ризик → багатовимірний ризик → взаємозалежні ризики → емерджентні властивості → каскадні процеси → системний ризик, що забезпечує цілісне математичне пояснення механізму виникнення системного ризику в складних взаємопов'язаних системах.

1. Аналіз сучасних досліджень. ***Від класичного ризику до багатокомпонентних моделей.*** Традиційно ризик розглядається як функція імовірності реалізації небажаної події та величини можливих збитків. Такий підхід знайшов широке застосування в міжнародних стандартах ризик-менеджменту та практиці управління ризиками [1—3].

Подальший розвиток методів оцінювання ризику привів до появи багатокомпонентних моделей, у яких ризик почав розглядатися як функція більшої кількості параметрів [15—19]. У загальному випадку багатокомпонентне представлення ризику визначається співвідношенням (2):

$$R = f\ (x_1, x_2, ..., x_n), \tag{2}$$

де x_i характеризують окремі складові ризику. Поява моделі (2) дозволила враховувати додаткові фактори ризику, однак не вирішила проблему взаємодії між компонентами системи. У результаті подальші дослідження були спрямовані на аналіз взаємозалежностей між елементами складних систем.

Дослідження взаємозалежностей. Одним із найважливіших напрямів сучасних досліджень стало вивчення взаємозалежностей між елементами складних систем. У роботах Rinaldi, Peerenboom та Kelly [5] було показано, що сучасні інфраструктурні системи формують складні мережі взаємодій, у яких відмова одного елемента може створювати наслідки для великої кількості інших компонентів. Подальші дослідження Ouyang [6] підтвердили, що структура взаємозв'язків між елементами є одним із ключових факторів формування складної поведінки систем. У результаті виникло розуміння того, що ризик визначається не лише характеристиками окремих компонентів, але й структурою взаємодій між ними. Саме ця обставина створила передумови для переходу від аналізу окремих ризиків до аналізу систем ризиків.

Каскадні процеси у складних системах. Подальший розвиток досліджень взаємозалежностей привів до формування окремого напряму, присвяченого каскадним процесам. У роботах Buldyrev та співавторів [20], а також Gao та співавторів [21] було показано, що навіть незначні

локальні порушення можуть запускати ланцюгові процеси відмов у взаємозалежних системах. Було встановлено, що поширення впливу між взаємопов'язаними компонентами може створювати наслідки, масштаби яких істотно перевищують наслідки первинної події. У результаті каскадні процеси почали розглядатися як один із ключових механізмів виникнення системних наслідків у складних системах.

Формування концепції системного ризику. Наступним етапом розвитку наукових досліджень стало формування концепції системного ризику. У роботах ECB, ESRB, IMF та FSB [7—10] системний ризик розглядається як ризик порушення функціонування всієї системи або значної її частини. Особливістю системного ризику є те, що він не може бути пояснений лише характеристиками окремих компонентів системи. У результаті виник системний підхід до аналізу ризиків, відповідно до якого поведінка системи визначається не лише рівнем окремих ризиків, але й структурою взаємозалежностей між ними.

Операційна стійкість як відповідь на системний ризик. Практичним наслідком розвитку концепції системного ризику стало формування підходів до забезпечення операційної стійкості. Сучасні документи BCBS, FSB, EBA та DORA [11—14] концентруються не лише на окремих ризиках, а й на здатності систем підтримувати виконання критичних операцій у разі реалізації несприятливих подій.

Характерною особливістю цих підходів є врахування:

- взаємозалежностей;
- концентрації ризиків;
- зовнішніх залежностей;
- сценарного аналізу.

Таким чином, операційна стійкість фактично є практичним відображенням системного підходу до аналізу ризиків.

Наукова проблема дослідження. Проведений аналіз показує, що сучасна література містить значну кількість досліджень, присвячених:

- багатокомпонентному ризику;
- взаємозалежностям;
- каскадним процесам;
- системному ризику;
- операційній стійкості.

Разом з тим практично відсутні роботи, які послідовно пояснюють механізм переходу від класичної двокомпонентної моделі ризику до системного ризику через багатовимірність ризику, взаємозалежності між його компонентами, емерджентні властивості та каскадні процеси. Саме ця проблема визначає логіку подальшого дослідження.

Висновок. Проведений аналіз сучасних досліджень показав, що розвиток наукових уявлень про ризик відбувається в напрямі переходу від класичних моделей оцінювання ризику до системних підходів, які враховують взаємозалежності між компонентами системи, каскадні процеси та системні наслідки реалізації ризиків.

Встановлено, що сучасні дослідження системного ризику та операційної стійкості значною мірою концентруються на практичних аспектах забезпечення функціонування складних систем. Разом з тим недостатньо дослідженим залишається математичний механізм переходу від класичної двокомпонентної моделі ризику до системного ризику. Ця обставина визначає актуальність подальшого дослідження та обґрунтовує необхідність аналізу класичної моделі ризику, який буде виконано в наступному розділі.

2. Аналіз класичної двокомпонентної моделі ризику. ***Класична модель ризику.*** У більшості підходів до управління ризиками ризик визначається як функція імовірності реалізації події та величини можливих збитків. Найбільш поширеним представленням ризику є співвідношення (1), яке використовується в міжнародних стандартах ризик-менеджменту та багатьох практичних методиках оцінювання ризиків [1—3]. Модель (1) дозволяє отримати кількісну оцінку ризику та використовувати її для порівняння різних сценаріїв реалізації небажаних подій. Саме завдяки своїй простоті вона стала однією з базових моделей ризик-менеджменту.

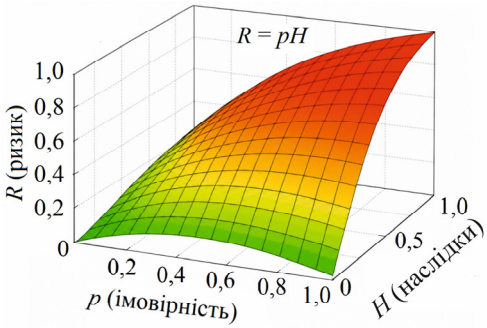
Особливий інтерес становить геометрична інтерпретація співвідношення (1), яка була досліджена в роботах [4, 5] та дозволяє розглядати ризик як геометричний об’єкт у просторі параметрів.

Геометрична інтерпретація ризику. Розглянемо простір координат (p, H, R), де p — імовірність реалізації події, H — величина можливих збитків, R — рівень ризику. У цьому просторі співвідношення (1) задає поверхню ризику [4, 5]. Геометричне представлення поверхні ризику наведено на рис. 1.

Із рис. 1 видно, що ризик є монотонною функцією як імовірності реалізації події, так і величини можливих збитків. Збільшення будь-якого з параметрів призводить до зростання ризику. Ця властивість безпосередньо випливає зі з частинних похідних ризику за параметрами p та H.

$$\frac{\partial R}{\partial p} = H,\ \frac{\partial R}{\partial H} = p.$$

Оскільки для області визначення моделі виконується $p \geq 0,\ H \geq 0,$ то похідні також є невід’ємними. Таким чином, модель (1) є монотонною відносно кожного зі своїх параметрів.



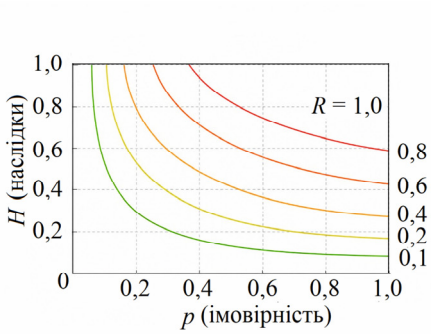


Рис. 1. Поверхня ризику, побудована відповідно до співвідношення (1)

Рис. 2. Ізолінії ризику для різних значень R

Ізолінії ризику. Для аналізу властивостей моделі (1) розглянемо множину станів, які відповідають однаковому рівню ризику. Нехай $R = R_0$, тоді із співвідношення (1) отримаємо $H = \dfrac{R_0}{p}$. Отримане співвідношення визначає сімейство гіпербол, які утворюють ізолінії ризику [4]. Відповідне геометричне представлення наведено на рис. 2. Із рисунку видно, що однаковий рівень ризику може досягатися різними комбінаціями імовірності та збитку. Наприклад,

$$0{,}1\times 100 = 10,\ \ 0{,}2\times 50 = 10,\ \ 0{,}5\times 20 = 10.$$

Усі наведені приклади відповідають одному значенню ризику та належать одній ізолінії.

Проблема еквівалентних ризиків. Незважаючи на однакові значення ризику, що були наведені вище, практичний зміст відповідних сценаріїв є різним. У першому випадку спостерігається подія з низькою імовірністю та значними наслідками. Третьому випадку маємо відносно часту подію з менш суттєвими наслідками. Таким чином, модель (1) не розрізняє ризики з однаковим значенням R, але різною структурою формування. Саме ця обставина є одним із перших проявів обмеженості двокомпонентної моделі ризику.

Основні обмеження двокомпонентної моделі. Проведений аналіз показує, що модель (1) базується на низці спрощувальних припущень. По-перше, ризик визначається лише двома параметрами. По-друге, передбачається незалежність параметрів $p \perp H$. По-третє, модель не враховує структуру системи та взаємозалежності між ризиками. По-четверте, вона не дозволяє описувати каскадні процеси та системні ефекти, які характерні для складних взаємопов'язаних систем [5, 6]. Таким чином, модель (1) є достатньою для аналізу окремих ризиків, але її можливості суттєво обмежуються під час дослідження складних соціотехнічних систем.

Необхідність переходу до багатокомпонентного ризику. Виявлені обмеження свідчать про те, що для опису складних систем необхідно враховувати додаткові характеристики, які не можуть бути представлені лише параметрами (p) та (H). У загальному випадку ризик доцільно розглядати як функцію більшої кількості змінних, що приводить до моделі (2). Саме співвідношення (2) створює математичні передумови для переходу від двокомпонентного до багатокомпонентного представлення ризику.

Висновок. Проведений аналіз показав, що класична модель ризику, визначена співвідношенням (1), забезпечує простий та наочний механізм кількісного оцінювання ризиків. Геометрична інтерпретація цієї моделі дозволяє представляти ризик у вигляді поверхні (рис. 1) та використовувати ізолінії ризику (рис. 2) для аналізу її властивостей [4, 5]. Разом з тим встановлено, що модель (1) базується на припущенні про незалежність параметрів та не дозволяє враховувати взаємозалежності між ризиками, каскадні процеси та системні ефекти. Отримані результати обґрунтовують необхідність переходу до багатокомпонентного представлення ризику, яке буде розглянуто в наступному розділі.

3. Перехід до багатокомпонентного ризику. ***Передумови переходу до багатокомпонентного представлення ризику.*** У попередньому розділі було показано, що класична модель ризику, визначена співвідношенням (1), забезпечує простий механізм кількісного оцінювання ризику, проте має низку принципових обмежень. Зокрема, модель (1) враховує лише два параметри та не дозволяє описувати складні взаємозв'язки між елементами системи. Для сучасних соціотехнічних систем, фінансового сектору та критичної інфраструктури такий підхід виявляється недостатнім [15—19]. У зв'язку з цим виникає необхідність переходу до багатокомпонентного представлення ризику, яке визначається співвідношенням (2).

Основні типи багатокомпонентних моделей. У сучасних дослідженнях використовуються декілька підходів до побудови багатокомпонентних моделей ризику [15—19]. Наприклад:

Адитивні моделі. У найпростішому випадку ризик визначається як зважена сума компонент:

$$R = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i, \tag{3}$$

де (w_i) — вагові коефіцієнти; (x_i) — компоненти ризику. Такі моделі широко використовуються в експертних методах оцінювання ризику та дозволяють агрегувати різнорідні параметри в єдиний показник.

Мультиплікативні моделі. Іншим підходом є представлення ризику як добутку окремих компонент:

$$R = \prod_{i=1}^{n} x_i. \tag{4}$$

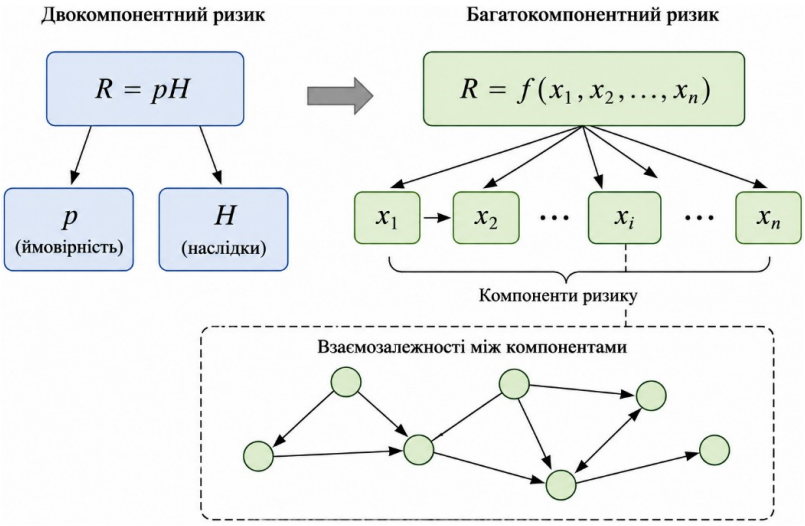


Рис. 3. Перехід від двокомпонентного до багатокомпонентного ризику

Модель (4) є природним узагальненням класичної моделі ризику та дозволяє враховувати підсилення або послаблення ризику окремими факторами.

Змішані моделі. У багатьох практичних задачах використовуються комбіновані конструкції виду:

$$R = pHg\,(x_3, x_4, ..., x_n), \tag{5}$$

де функція $g\,(x_3, x_4, ..., x_n)$ характеризує вплив додаткових параметрів ризику. Подібний підхід дозволяє зберегти інтерпретацію класичної моделі ризику та одночасно враховувати особливості складних систем.

Аналогічні підходи до агрегування множини ризиків розглядаються також у роботі [28], де досліджуються адитивні та комбіновані механізми агрегування ризиків, спричинених множиною сумісних випадкових подій. Показано, що просте арифметичне додавання ризиків не завжди забезпечує адекватне представлення сукупного ризику.

Геометричний зміст переходу до багатокомпонентного ризику. Перехід від співвідношення (1) до моделі (2) означає не лише збільшення кількості параметрів. Фактично відбувається зміна розмірності ризикового простору. Для класичної моделі ризик визначається двома параметрами та може бути представлений поверхнею в просторі координат ((p, H, R)). Для моделі (2) необхідно розглядати простір $(x_3, x_4, ..., x_n, R)$, розмірність якого зростає разом із кількістю компонент ризику. Геометричний зміст такого переходу наведено на рис. 3. Із рисунку видно, що кожне додавання нового параметра призводить до збільшення розмірності ризикового простору та ускладнення його структури.

Проблема розмірності. Одним із наслідків переходу до багатокомпонентного ризику є експоненційне зростання кількості можливих станів системи. Нехай кожний параметр може набувати k різних значень. Тоді загальна кількість можливих станів визначається співвідношенням:

$$N = k^n. \tag{6}$$

Із співвідношення (6) випливає, що навіть незначне збільшення кількості параметрів призводить до різкого зростання кількості можливих комбінацій станів системи [18, 19]. Таким чином, багатокомпонентний ризик характеризується значно складнішою структурою порівняно з двокомпонентною моделлю.

Чутливість багатокомпонентної моделі. Для мультиплікативної моделі (4) чутливість ризику до зміни окремого параметра визначається співвідношенням:

$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = \frac{R}{x_i}. \tag{7}$$

Із співвідношення (7) випливає, що внесок окремих компонент у загальний ризик може істотно відрізнятися. Таким чином, навіть за відсутності взаємозалежностей різні компоненти ризику можуть по-різному впливати на загальний рівень ризику.

Обмеження багатокомпонентного підходу. Незважаючи на суттєве розширення можливостей моделювання, модель (2) все ще базується на припущенні про незалежність компонентів ризику. Для більшості складних систем таке припущення не виконується. Зміна одного компонента може впливати на інші компоненти системи та змінювати їх характеристики. У результаті виникає необхідність врахування взаємодій між компонентами ризику. Саме ця обставина створює передумови для переходу до моделі взаємозалежних ризиків, яка буде розглянута в наступному розділі.

Висновок. Показано, що класична модель ризику є окремим випадком багатокомпонентного представлення ризику, визначеного співвідношенням (2). Встановлено, що перехід до багатокомпонентного ризику супроводжується збільшенням розмірності ризикового простору та експоненційним зростанням кількості можливих станів системи. Показано, що навіть за відсутності взаємозалежностей багатокомпонентна модель має складнішу структуру порівняно з класичною моделлю ризику. Отримані результати обґрунтовують необхідність врахування взаємодій між компонентами ризику та створюють передумови для побудови моделі взаємозалежних ризиків, яка буде розглянута в наступному розділі.

4. Взаємозалежності між компонентами ризику. ***Передумови виникнення взаємозалежностей.*** У попередньому розділі було показано, що ризик може бути представлений багатокомпонентною моделлю (2), яка дозволяє враховувати довільну кількість параметрів ризику.

Разом з тим моделі (2)—(5) базуються на припущенні про незалежність компонент ризику. Таке припущення є прийнятним для відносно простих систем, проте для складних соціотехнічних систем воно часто не виконується [5, 6].

У сучасних фінансових системах, електронних комунікаціях та об'єктах критичної інфраструктури окремі елементи перебувають у постійній взаємодії. У результаті зміна одного компонента ризику може впливати на інші компоненти системи. Для врахування цього ефекту необхідно перейти від моделі незалежних ризиків до моделі взаємозалежних ризиків.

Модель взаємозалежних ризиків. Нехай система складається з множини ризиків $R_1, R_2, ..., R_n$. У загальному випадку ризик системи може бути представлений співвідношенням:

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i + \sum_{i \neq j} \alpha_{ij} R_i R_j, \tag{8}$$

де R_i — ризики окремих компонентів; α_{ij} — коефіцієнти взаємозалежності. Перша складова співвідношення (8) характеризує власний внесок окремих ризиків, а друга складова описує ефекти взаємодії між ними, що слід розглядати як узагальнену концептуальну модель взаємодії ризиків, а не як єдино можливу форму їх математичного представлення. На відміну від моделей (2)—(5), співвідношення (8) враховує не лише характеристики окремих ризиків, але й структуру зв'язків між ними.

Матриця взаємозалежностей. Для систем із великою кількістю ризиків зручно використовувати матричне представлення взаємодій. Структура взаємозалежностей визначається матрицею:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & 0 & \cdots & \alpha_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Елемент α_{ij} характеризує вплив ризику R_i на ризик R_j.

Матриця (9) дозволяє перейти від аналізу окремих ризиків до аналізу системи ризиків. Саме вона визначає структуру взаємодій між компонентами ризику та є математичною основою подальшого аналізу нелінійності, емерджентних властивостей і системного ризику.

Позитивні та негативні взаємозалежності. Знак коефіцієнта α_{ij} визначає характер взаємодії між ризиками. Якщо $\alpha_{ij} > 0$, то реалізація одного ризику збільшує інший ризик. Такі взаємодії будемо називати позитивними. Прикладом може бути ситуація, коли відмова електронної інфраструктури збільшує ризик недоступності сервісів. Якщо $\alpha_{ij} < 0$, то один

фактор частково компенсує вплив іншого. Такі взаємодії будемо називати негативними. Прикладом можуть бути резервні центри обробки даних або дублюючі канали зв'язку.

Геометричний зміст взаємодій. У Розділі 3 було показано, що збільшення кількості компонент ризику призводить до ускладнення геометричної структури ризикового простору. Геометричний зміст цього переходу наведено на рис. 4. Із рисунку видно, що зі збільшенням кількості компонент ризику множина станів однакового ризику набуває дедалі складнішої геометричної структури. Поява взаємодій між компонентами ризику призводить до подальшої зміни цієї структури.

Деформація ризикового простору. Одним із найважливіших наслідків взаємозалежностей є деформація ризикового простору. У випадку незалежних ризиків ризикова поверхня визначається лише характеристиками окремих компонентів. Після врахування взаємодій між ризиками структура ризикового простору починає визначатися матрицею взаємозалежностей (9). Геометрична інтерпретація такого ефекту наведена на рис. 5. Із рисунку видно, що навіть незначні взаємодії між компонентами можуть істотно змінювати структуру ризикового простору. Саме ця деформація є першим проявом нелінійності системи ризиків.

Наслідки взаємозалежностей. Поява взаємодій між ризиками призводить до низки принципово нових властивостей системи. По-перше, ризик перестає бути простою сумою окремих складових. По-друге, виникають області підвищеної чутливості до змін параметрів. По-третє, система набуває нелінійного характеру.

У результаті поведінка системи визначається не лише величиною окремих ризиків, але й структурою взаємодій між ними. Саме ці властивості створюють передумови для виникнення емерджентних ефектів.

Висновок. Показано, що багатокомпонентна модель ризику набуває принципово нових властивостей після врахування взаємозалежностей між її компонентами. Для опису таких взаємодій запропоновано модель взаємозалежних ризиків (8) та матрицю взаємозалежностей (9). Встановлено, що структура взаємодій визначає геометрію ризикового простору та призводить до його деформації. Отримані результати демонструють, що взаємозалежності є джерелом нелінійності системи ризиків та створюють передумови для виникнення емерджентних властивостей, які будуть розглянуті в наступному розділі.

5. Емерджентні властивості та каскадні ефекти. ***Виникнення емерджентних властивостей.*** У попередньому розділі було показано, що врахування взаємозалежностей між компонентами ризику призводить до деформації ризикового простору та виникнення нелінійності. При цьому поведінка системи починає визначатися не лише характеристиками окремих

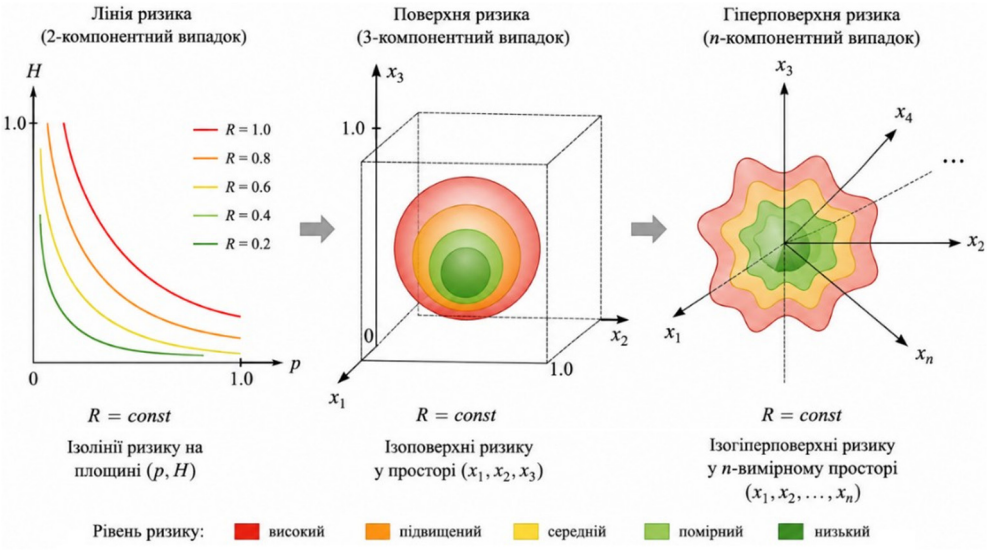


Рис. 4. Геометрична еволюція ризикового простору

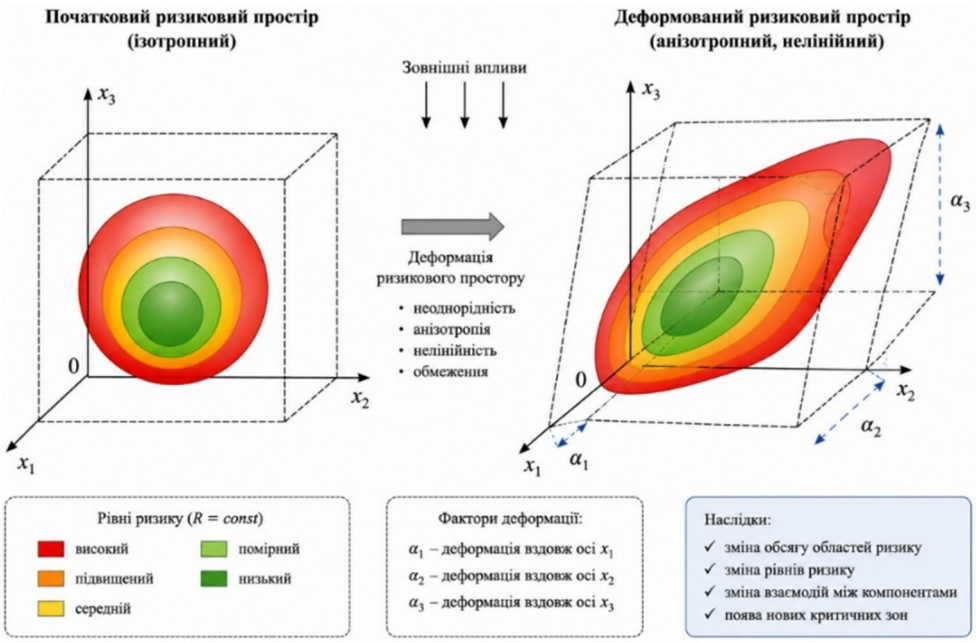


Рис. 5. Деформація ризикового простору внаслідок взаємозалежностей

5. Емерджентні властивості та каскадні ефекти. ***Виникнення емерджентних властивостей.*** У попередньому розділі було показано, що врахування взаємозалежностей між компонентами ризику призводить до деформації ризикового простору та виникнення нелінійності. При цьому

поведінка системи починає визначатися не лише характеристиками окремих ризиків, але й структурою взаємодій між ними. Одним із наслідків такої взаємодії є поява нових властивостей системи, які відсутні в її окремих компонентах.

У теорії складних систем такі властивості прийнято називати емерджентними. Емерджентність визначається як виникнення властивостей системи, які не можуть бути безпосередньо виведені з властивостей окремих елементів і з'являються виключно внаслідок їх взаємодії [22, 23]. Емерджентність є результатом колективної поведінки елементів системи та не може бути пояснена шляхом ізольованого аналізу окремих компонентів. Інакше кажучи, властивості системи не зводяться до простої суми властивостей її складових. Саме тому аналіз окремих ризиків не дозволяє повністю описати поведінку складної системи.

Емерджентність у системах ризиків. Розглянемо систему ризиків, описану моделлю (8). Якщо всі коефіцієнти взаємодії дорівнюють нулю, система поводиться як сукупність незалежних ризиків. У цьому випадку загальний ризик визначається лише характеристиками окремих компонентів.

Проте при $\alpha_{ij} \neq 0$ між ризиками виникають взаємодії. У результаті можуть з'являтися ефекти, які відсутні в окремих ризиках. Наприклад, два ризики, кожен із яких має прийнятний рівень, можуть разом створювати неприйнятний результат.

Таким чином, емерджентні властивості є прямим наслідком взаємодії між компонентами системи та не можуть бути пояснені шляхом ізольованого аналізу її окремих елементів [22, 23].

Порогові явища. Однією з характерних особливостей емерджентних систем є наявність порогових станів. До певного моменту система може компенсувати негативний вплив окремих подій. Проте після досягнення певного критичного рівня відбувається якісна зміна її стану. У результаті виникає новий режим функціонування системи.

Саме наявність таких переходів пояснює, чому складні системи можуть демонструвати різкі зміни поведінки навіть за незначної зміни окремих параметрів. Порогові явища є одним із механізмів формування емерджентних властивостей.

Від емерджентності до каскадних процесів. Якщо взаємодія між ризиками має спрямований характер, виникають умови для поширення впливу між компонентами системи. У найпростішому випадку такий процес описується співвідношенням (10):

$$R_1 \to R_2 \to ... \to R_n. \tag{10}$$

У цьому випадку реалізація одного ризику створює умови для виникнення наступного ризику. У результаті формується послідовність взаємо-

пов'язаних подій. Саме так виникають каскадні процеси. На відміну від локальних порушень, каскадні процеси здатні поширюватися значною частиною системи та суттєво збільшувати масштаби наслідків [20, 21].

Геометрична інтерпретація каскадного поширення. У попередніх розділах ризик розглядався як точка або область у багатовимірному ризиковому просторі. Після появи каскадних процесів система перестає залишатися в одному стані. Відбувається послідовний перехід між різними станами системи.

Геометрично такий процес можна інтерпретувати як рух системи по траєкторії ризикового простору. Механізм каскадного поширення наведено на рис. 6. Із рисунку видно, що вплив ризику може поширюватися далеко за межі первинного джерела виникнення. У результаті локальне порушення здатне створювати масштабні наслідки для системи в цілому.

Наслідки емерджентності. Поява емерджентних властивостей і каскадних процесів означає, що система ризиків набуває нових характеристик, які не можуть бути отримані шляхом аналізу окремих компонентів. У результаті виникають системні наслідки, масштаби яких визначаються не окремими ризиками, а структурою взаємодій між ними. Таким чином, емерджентні властивості та каскадні процеси формують новий рівень поведінки системи, який не може бути описаний лише характеристиками окремих ризиків.

Висновок. Показано, що врахування взаємозалежностей між компонентами ризику призводить до виникнення емерджентних властивостей, які відсутні в окремих елементах системи. Встановлено, що емерджентність є наслідком нелінійності ризикового простору та виникає виключно внаслідок взаємодії між компонентами системи. Доведено, що поширення впливу між взаємозалежними ризиками формує каскадні процеси, здатні змінювати стан значної частини системи. Отримані результати свідчать про появу нового рівня поведінки системи, який не може бути пояснений у межах аналізу окремих ризиків.

6. Формування системного ризику. ***Передумови виникнення системного ризику.*** У попередніх розділах було показано, що перехід від класичної моделі ризику (1) до багатокомпонентного представлення ризику (2) призводить до збільшення розмірності ризикового простору. Подальше врахування взаємозалежностей між компонентами ризику за допомогою моделі (8) створює умови для виникнення нелінійності, емерджентних властивостей та каскадних процесів. У результаті поведінка системи починає визначатися не лише характеристиками окремих ризиків, але й структурою взаємодій між ними. Саме ця обставина створює передумови для виникнення системного ризику.

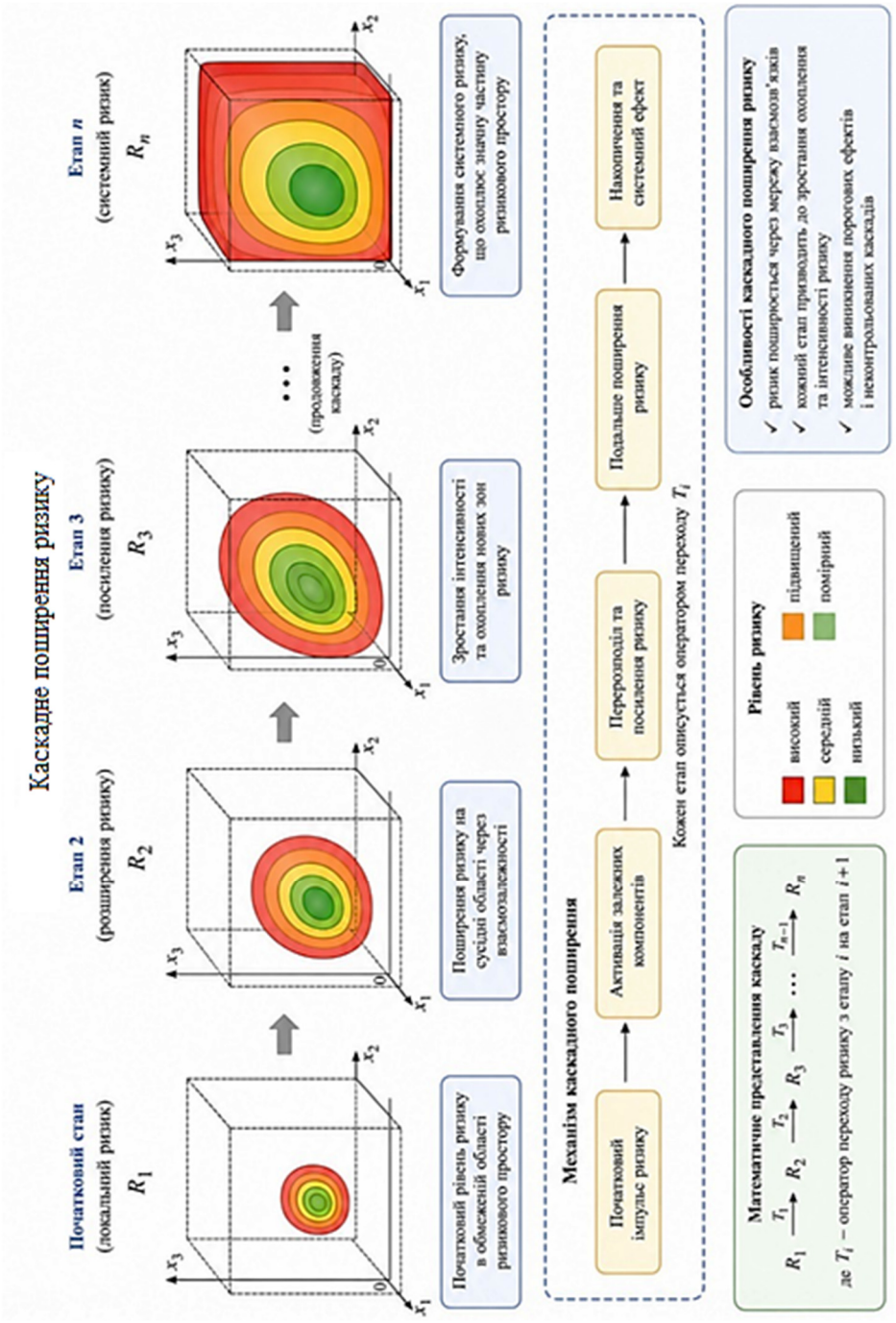


Рис. 6. Каскадне поширення ризику

На відміну від локального ризику, який характеризує окремий елемент системи, системний ризик пов'язаний із можливістю порушення функціонування системи в цілому або значної її частини [7—10].

Системний ризик як властивість системи. У класичних підходах до ризик-менеджменту загальний ризик системи часто розглядається як результат агрегування ризиків її окремих компонентів. Однак результати розділів 4 та 5 показали, що після появи взаємозалежностей між ризиками виникають емерджентні властивості та каскадні процеси, які не можуть бути пояснені шляхом аналізу окремих компонентів системи. У зв'язку з цим системний ризик не може бути представлений простою сумою локальних ризиків:

$$SR \neq \sum_{i=1}^{n} R_i. \tag{11}$$

Співвідношення (11) є головним результатом проведеного дослідження. Якщо для задачі агрегування ризиків вже показано неможливість універсального використання адитивного представлення сукупного ризику [28], то для складних систем із взаємозалежностями, емерджентними властивостями та каскадними процесами така неможливість стає фундаментальною властивістю системи, що формалізовано співвідношенням (11). Таким чином, системний ризик є властивістю системи взаємодіючих ризиків, а не окремих її компонентів.

Співвідношення (11) узгоджується з сучасними дослідженнями системного ризику у фінансовому секторі, які показують, що стійкість системи не може бути отримана шляхом простого агрегування характеристик окремих її елементів [7—18].

Системна значущість елементів. Одним із наслідків співвідношення (11) є необхідність врахування ролі окремих елементів у структурі системи. Розглянемо систему, що складається з множини взаємопов'язаних елементів. Навіть за однакового рівня локального ризику різні елементи можуть мати різний вплив на функціонування системи. Для кількісного опису такого впливу використовується показник системної значущості елемента:

$$SI_i = \sum_{j=1}^{n} m_{ij}, \tag{12}$$

де m_{ij} характеризує вплив елемента i на елемент j. Чим більше значення показника (12), тим більшим є потенціал поширення впливу від відповідного елемента на інші компоненти системи. У результаті навіть відносно невеликий локальний ризик може набувати системного характеру.

Порогова природа системного ризику. Ще однією характерною особливістю системного ризику є наявність критичних порогів функціонування системи. До певного моменту система здатна компенсувати негативний

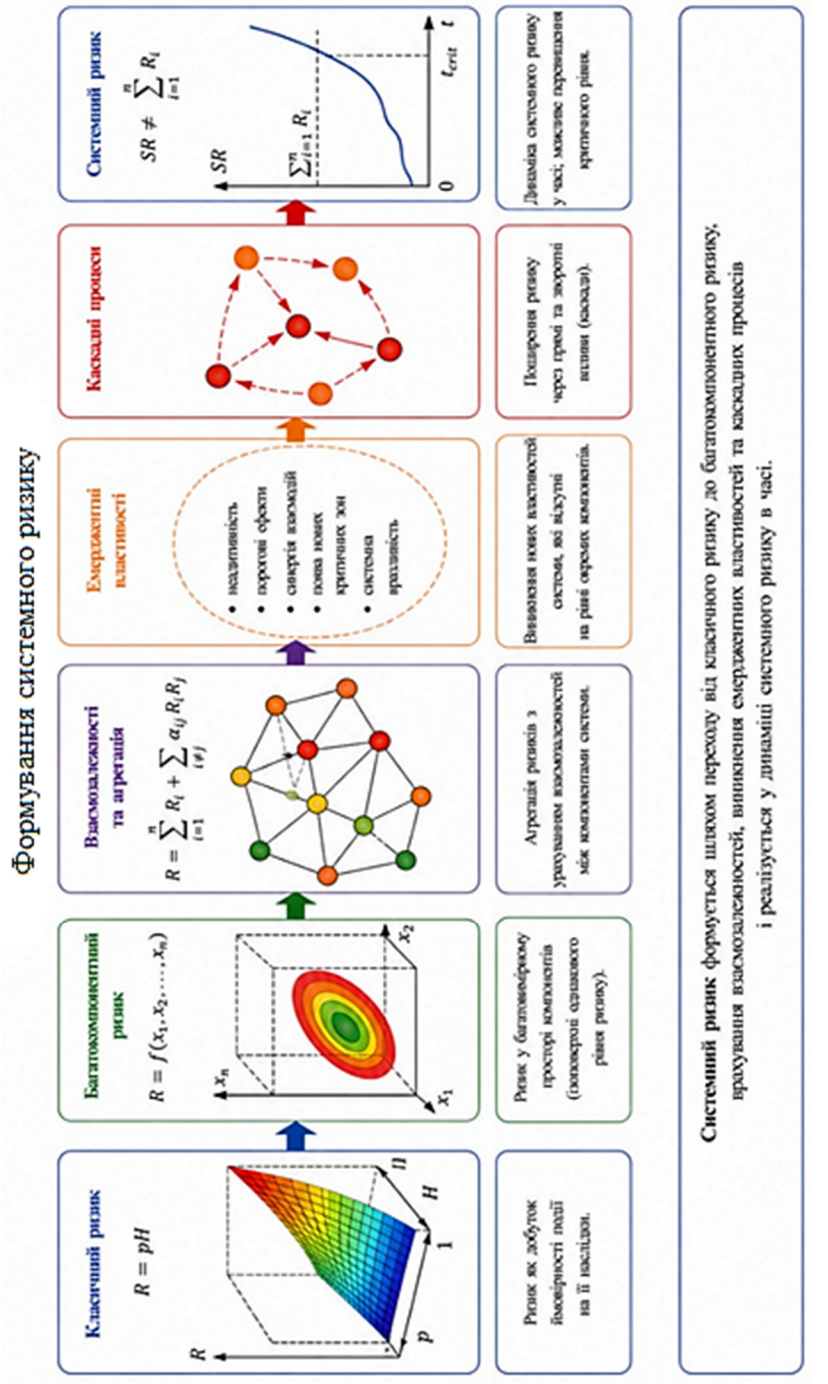


Рис. 7. Формування системного ризику

ISSN 3083–7839. Electronic Modeling. 2026. V. 48. № 5

вплив окремих подій за рахунок резервування, дублювання функцій, альтернативних маршрутів або організаційних процедур. У такому випадку виконується умова

$$I < I_{crit} \Rightarrow SR = 0, \tag{13}$$

де I — інтегральний вплив на систему; I_{crit} — критичне значення впливу.

Після досягнення критичного порогу відбувається якісна зміна стану системи:

$$I < I_{crit} \Rightarrow SR > 0. \tag{14}$$

Співвідношення (13) та (14) відображають порогову природу системного ризику та пояснюють механізм виникнення системних криз у складних системах.

Геометрична інтерпретація системного ризику. У розділі 4 було показано, що взаємодії між ризиками призводять до деформації ризикового простору. Після виникнення каскадних процесів система перестає залишатися в одному стані та починає переходити між різними областями ризикового простору. У результаті системний ризик доцільно розглядати не як окрему точку ризикового простору, а як область станів, потрапляння до якої призводить до порушення функціонування системи. Таким чином, системний ризик є геометричною властивістю ризикового простору, сформованого взаємодією між його компонентами.

Формування системного ризику. На підставі результатів попередніх розділів процес формування системного ризику може бути представлений як послідовність переходів:

(1) → (2) → (8) → емерджентні властивості → каскадні процеси → (11)

Графічне представлення цього процесу наведено на рис. 7.

Із рис. 7 видно, що системний ризик є закономірним результатом послідовного ускладнення структури ризикової системи. Таким чином, системний ризик не є окремим видом ризику, а являє собою новий рівень поведінки системи, який виникає внаслідок взаємодії між її компонентами.

Висновки до розділу. Показано, що системний ризик є властивістю системи взаємодіючих ризиків і не може бути представлений простою сумою локальних ризиків. Ця властивість формалізована співвідношенням (11), яке є головним результатом проведеного дослідження. Встановлено, що виникнення системного ризику пов’язане з наявністю системно значущих елементів, критичних порогів функціонування та механізмів поширення впливу між компонентами системи. Показано, що системний ризик є закономірним наслідком переходу від класичної моделі ризику до багатокомпонентного ризику, врахування взаємозалежностей, появи емерджентних властивостей та розвитку каскадних процесів.

7. Практичне застосування моделі. ***Загальні положення.*** Результати проведеного дослідження показали, що розвиток ризику в складних системах відбувається шляхом переходу від класичної моделі ризику до системного ризику через багатовимірність, взаємозалежності, емерджентні властивості та каскадні процеси. Отримані результати мають не лише теоретичне, але й практичне значення.

У сучасних соціотехнічних системах основною проблемою є не оцінювання окремих ризиків, а розуміння того, яким чином їх взаємодія впливає на здатність системи виконувати свої функції.

Саме тому побудована модель може використовуватися для аналізу складних систем, у яких присутні:

- значна кількість взаємопов'язаних елементів;
- взаємозалежні ризики;
- каскадні процеси;
- системні наслідки реалізації ризиків.

До таких систем належать фінансовий сектор, платіжна інфраструктура, електронні комунікації та об'єкти критичної інфраструктури [17—27].

Аналіз впливу ризиків на критичні функції. Одним із напрямів практичного застосування отриманих результатів є аналіз впливу ризиків на критичні функції системи.

Нехай CF_i — критична функція системи. На виконання цієї функції впливає множина ризиків $R_1, R_2, ..., R_n$. У такому випадку інтегральний вплив на критичну функцію визначається співвідношенням

$$I_{CF_i} = F\,(R_1, R_2, ..., R_n). \tag{15}$$

Співвідношення (15) показує, що об'єктом аналізу стає не окремий ризик, а сукупний вплив ризиків на здатність системи підтримувати виконання критичної функції.

На відміну від класичного підходу, у якому оцінюються окремі ризики, співвідношення (15) дозволяє враховувати сукупний вплив ризиків на функціонування системи. Таким чином, оцінювання ризику здійснюється не лише щодо окремих подій, але й щодо їх впливу на здатність системи підтримувати виконання визначених функцій.

Приклад для платіжної системи. Розглянемо платіжну систему, критичною функцією якої є проведення міжбанківських платежів. Позначимо цю функцію як CF_p. На її виконання можуть впливати:

- ризик відмови інфраструктури електронних комунікацій;
- ризик реалізації кіберзагрози;
- ризик відмови центру обробки даних;
- ризик помилки персоналу.

У межах класичного підходу кожний із цих ризиків може оцінюватися окремо. Проте результати попередніх розділів показують, що між зазначеними ризиками можуть існувати взаємозалежності. Наприклад, реалізація кіберзагрози може призводити до відмови центру обробки даних, а відмова центру обробки даних може впливати на виконання функції CF_p.

У такому випадку навіть за прийнятного рівня окремих ризиків може виникати неприйнятний вплив на критичну функцію. Саме ця ситуація є практичним проявом системного ризику.

Практичне значення для фінансового сектору. Для фінансового сектору запропонований підхід дозволяє:

- виявляти системно значущі залежності;
- аналізувати концентрацію ризиків;
- оцінювати системний ризик;
- будувати сценарії розвитку подій;
- оцінювати вплив ризиків на критичні функції фінансової інфраструктури.

Таким чином, об'єктом аналізу стає не лише окремий ризик, але й структура взаємодій між ризиками та їх сукупний вплив на функціонування фінансової системи [17—20].

Практичне значення для критичної інфраструктури. Для критичної інфраструктури одним із ключових факторів ризику є взаємозалежність між різними секторами.

Функціонування фінансового сектору залежить від:

- електропостачання;
- інфраструктури електронних комунікацій;
- центрів обробки даних;
- зовнішніх постачальників технологічних послуг.

У свою чергу відмова одного з таких компонентів може запускати каскадні процеси, описані співвідношенням (10). У результаті виникають системні наслідки, масштаби яких значно перевищують первинний вплив окремої події.

Необхідність врахування міжсекторальних залежностей прямо відображена в сучасних підходах до забезпечення стійкості критичної інфраструктури, зокрема в CER Directive та NIS2 Directive [24,25]. Саме тому аналіз ризиків критичної інфраструктури потребує врахування не лише окремих ризиків, але й структури взаємодій між ними [24—27].

Узагальнення результатів дослідження. Проведене дослідження дозволило побудувати послідовну модель розвитку ризику від його класичного представлення до системного рівня:

(1) → (2) → (8) → емерджентні властивості → каскадні процеси → (11).

Початковою точкою є класична модель ризику (1). Подальше узагальнення приводить до багатокомпонентного ризику (2). Врахування взаємозалежностей між компонентами приводить до моделі (8). У результаті виникають емерджентні властивості та каскадні процеси, які формують системний ризик, визначений співвідношенням (11).

Таким чином, системний ризик є закономірним результатом розвитку багатокомпонентного ризику в складних взаємопов'язаних системах.

Висновок. Показано, що результати проведеного дослідження можуть бути використані для аналізу ризиків складних соціотехнічних систем, насамперед у фінансовому секторі та критичній інфраструктурі. Встановлено, що основним практичним наслідком переходу від класичного ризику до системного ризику є можливість аналізу не лише окремих ризиків, але й структури їх взаємодій та сукупного впливу на критичні функції системи. Отримані результати створюють наукове підґрунтя для подальшого розвитку підходів до управління ризиками, оцінювання впливу на критичні функції та формування вимог до стійкості складних соціотехнічних систем.

Висновки

У роботі досліджено математичні та геометричні наслідки переходу від класичної двокомпонентної моделі ризику до багатокомпонентного представлення ризику в складних соціотехнічних системах.

Показано, що класична модель ризику, визначена співвідношенням (1), є окремим випадком більш загальної багатокомпонентної моделі ризику (2). Встановлено, що збільшення кількості компонент ризику призводить до зміни геометричної структури ризикового простору та експоненційного зростання кількості можливих станів системи.

Для врахування взаємодій між компонентами ризику запропоновано модель взаємозалежних ризиків (8) та матрицю взаємозалежностей (9). Показано, що врахування взаємозалежностей призводить до деформації ризикового простору та виникнення нелінійності, у результаті чого поведінка системи починає визначатися не лише характеристиками окремих ризиків, але й структурою взаємодій між ними.

Встановлено, що взаємодія між ризиками створює умови для виникнення емерджентних властивостей та каскадних процесів. Показано, що поширення впливу між взаємозалежними компонентами системи формує каскадні процеси, які можуть призводити до масштабних наслідків та зміни стану системи в цілому.

Доведено, що системний ризик є закономірним результатом розвитку багатокомпонентного ризику в умовах взаємозалежностей, емерджентних властивостей та каскадних процесів. Показано, що системний ризик не

може бути представлений простою сумою локальних ризиків, що формалізовано співвідношенням (11).

Таким чином, у роботі побудовано послідовний ланцюг переходу від класичної моделі ризику до системного ризику (1)→(2)→(8)→(10)→(11), який забезпечує цілісне математичне пояснення формування системного ризику в складних взаємопов'язаних системах.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання для аналізу ризиків складних соціотехнічних систем, зокрема фінансового сектору та критичної інфраструктури. Показано можливість застосування запропонованого підходу для оцінювання впливу ризиків на критичні функції системи за допомогою співвідношення (15), а також для аналізу системних наслідків взаємодії між ризиками.

Отримані результати можуть бути використані під час подальшого розвитку підходів до управління ризиками, оцінювання впливу на критичні функції та формування вимог до стійкості складних соціотехнічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Guidance on managing information security risks. Geneva : ISO, 2022.
2. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva : ISO, 2022.
3. ISO 31000:2018. Risk Management — Guidelines. Geneva : ISO, 2018.
4. Мохор В.В., Бакалинський О.В., Богданов О.В., Цуркан В.В. Інтерпретування залежності рівня простого ризику від імовірності його реалізування в термінах аналітичної геометрії. *Information Technology and Security*. 2017, Т. 5, № 1(8). С. 71—81.
5. Rinaldi S.M., Peerenboom J.P., Kelly T.K. Identifying, Understanding and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies *IEEE Control Systems Magazine*. 2001. Vol. 21, No. 6. P. 11—25.
6. Ouyang M. Review on Modeling and Simulation of Interdependent Critical Infrastructure Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. Vol. 121. P. 43—60.
7. European Central Bank. Towards a Framework for Assessing Systemic Cyber Risk *ECB Financial Stability Review*. Frankfurt am Main : ECB, 2022.
8. European Systemic Risk Board. Systemic Cyber Risk. Frankfurt am Main : ESRB, 2020.
9. International Monetary Fund. Global Financial Stability Report. Washington, DC : IMF, 2024.
10. Financial Stability Board. Financial Stability Implications of Operational Disruptions: Annual Report. Basel : FSB, 2025.
11. Basel Committee on Banking Supervision. Principles for Operational Resilience. Basel: Bank for International Settlements, 2021.
12. Financial Stability Board. Principles for Operational Resilience. Basel : FSB, 2021.
13. European Banking Authority. Operational Resilience. Paris : EBA, 2025.
14. Regulation (EU) 2022/2554 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on Digital Operational Resilience for the Financial Sector (DORA).
15. Kaplan S., Garrick B.J. On the Quantitative Definition of Risk . *Risk Analysis*. 1981. Vol. 1, No. 1. P. 11—27.

16. Aven T. Risk Assessment and Risk Management: Review of Recent Advances on Their Foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 253, No. 1. P. 1—13.
17. Haimes Y.Y. Risk Modeling, Assessment and Management. 5th ed. Hoboken : Wiley, 2015.
18. Hubbard D.W. The Failure of Risk Management: Why It's Broken and How to Fix It. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2020.
19. Cox L.A. What's Wrong with Risk Matrices? *Risk Analysis.* 2008. Vol. 28, No. 2. P. 497—512.
20. Buldyrev S.V., Parshani R., Paul G., Stanley H.E., Havlin S. Catastrophic Cascade of Failures in Interdependent Networks . *Nature*. 2010. Vol. 464. P. 1025—1028.
21. Gao J., Buldyrev S.V., Stanley H.E., Havlin S. Networks Formed from Interdependent Networks. *Nature Physics.* 2012. Vol. 8. P. 40—48.
22. Holland J.H. Emergence: From Chaos to Order. — Reading, MA : Addison-Wesley, 1998.
23. Mitchell M. Complexity: A Guided Tour. Oxford : Oxford University Press, 2009.
24. Directive (EU) 2022/2557 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on the Resilience of Critical Entities (CER Directive).
25. Directive (EU) 2022/2555 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on Measures for a High Common Level of Cybersecurity Across the Union (NIS2 Directive).
26. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). ENISA Threat Landscape 2024. Heraklion : ENISA, 2024.
27. European Commission Joint Research Centre. Critical Entities Resilience Framework. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2022.
28. Гончар С.Ф., Бакалинський О.О., Дибач О.М., Дімітрієва Д.О. Метод агрегування ризиків у разі множини сумісних випадкових подій. *Ядерна та радіаційна безпека.* 2022. № 1(93). С. 46—52. DOI: 10.32918/nrs.2022.1(93).05.

Стаття надійшла 30.06.2026;
Прорецензована 07.07.2026

REFERENCES

1. ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Guidance on managing information security risks. Geneva : ISO, 2022.
2. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva : ISO, 2022.
3. ISO 31000:2018. Risk Management — Guidelines. Geneva : ISO, 2018.
4. Mokhor V.V., Bakalynskyi O.V., Bohdanov O.V., Tsurkan V.V. (2017) Interpretuvannia zalezhnosti rivnia prostoho ryzyku vid imovirnosti yoho realizuvannia v terminakh analitychnoi heometrii [Interpretation of the dependence of simple risk level on the probability of its realization in terms of analytical geometry]. *Information Technology and Security.* Vol. 5, No. 1(8). P. 71—81. (in Ukrainian).
5. Rinaldi S.M., Peerenboom J.P., Kelly T.K. (2001). Identifying, Understanding and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*. Vol. 21, No. 6. P. 11—25.
6. Ouyang M. (2014) Review on Modeling and Simulation of Interdependent Critical Infrastructure Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 121. P. 43—60.
7. European Central Bank (ECB). Towards a Framework for Assessing Systemic Cyber Risk *ECB Financial Stability Review*. Frankfurt am Main : ECB, 2022.
8. European Systemic Risk Board. Systemic Cyber Risk. —Frankfurt am Main : ESRB, 2020.
9. International Monetary Fund. Global Financial Stability Report. — Washington, DC : IMF, 2024.

10. Financial Stability Board. Financial Stability Implications of Operational Disruptions : Annual Report. Basel : FSB, 2025.
11. Basel Committee on Banking Supervision. Principles for Operational Resilience. Basel : Bank for International Settlements, 2021.
12. Financial Stability Board. Principles for Operational Resilience. Basel : FSB, 2021.
13. European Banking Authority. Operational Resilience. Paris : EBA, 2025.
14. Regulation (EU) 2022/2554 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on Digital Operational Resilience for the Financial Sector (Digital Operational Resilience Act — DORA).
15. Kaplan S., Garrick B.J. (1981). On the Quantitative Definition of Risk. *Risk Analysis*. Vol. 1, No. 1. P. 11—27.
16. Aven T. (2016) Risk Assessment and Risk Management: Review of Recent Advances on Their Foundation. *European Journal of Operational Research*. Vol. 253, No. 1. P. 1—13.
17. Haimes Y.Y. (2015) Risk Modeling, Assessment and Management. 5th ed. Hoboken, NJ : Wiley.
18. Hubbard D.W. (2020) The Failure of Risk Management: Why It's Broken and How to Fix It. 2nd ed. Hoboken, NJ : Wiley.
19. Cox L.A. (2008) What's Wrong with Risk Matrices? *Risk Analysis*. Vol. 28, No. 2. P. 497—512.
20. Buldyrev S.V., Parshani R., Paul G., Stanley H.E., Havlin S. (2010) Catastrophic Cascade of Failures in Interdependent Networks. *Nature*. Vol. 464. P. 1025—1028.
21. Gao J., Buldyrev S.V., Stanley H.E., Havlin S. (2012) Networks Formed from Interdependent Networks. *Nature Physics.* Vol. 8. P. 40—48.
22. Holland J.H. (1998) Emergence: From Chaos to Order. Reading, MA : Addison-Wesley.
23. Mitchell M. (2009) Complexity: A Guided Tour. Oxford : Oxford University Press.
24. Directive (EU) 2022/2557 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on the Resilience of Critical Entities (CER Directive).
25. Directive (EU) 2022/2555 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on Measures for a High Common Level of Cybersecurity Across the Union (NIS2 Directive).
26. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). ENISA Threat Landscape 2024. Heraklion : ENISA, 2024.
27. European Commission Joint Research Centre. Critical Entities Resilience Framework. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2022.
28. Honchar S.F., Bakalynskyi O.O., Dybach O.M., Dimitriieva D.O. (2022) Metod ahrehuvannia ryzykiv u razi mnozhyny sumisnykh vypadkovykh podii [Method of risk aggregation under multiple compatible random events]. *Yaderna ta Radiatsiina Bezpeka*. No. 1(93). P. 46—52. DOI: 10.32918/nrs.2022.1(93).05. (in Ukrainian).

Article received 30.06.2026;
Reviewed 07.07.2026

O. Bakalynskyi

THE CONCEPT OF MULTIDIMENSIONAL SECURITY RISK IN SOCIOTECHNICAL SYSTEMS IN MODELING THE PROCESSES OF SYSTEMIC THREATS

A concept of multidimensional security risk in socio-technical systems is proposed as a generalization of the classical two-component risk model. It is shown that an increase in the number of risk components leads to an increase in the dimensionality of the risk space and the formation of new system properties that cannot be explained within the framework of traditional additive

approaches. To describe the interaction between risk components, a model of interdependent risks and a matrix of interdependencies have been developed, which allow for the formalization of the nonlinearity of risk formation processes. The emergence of emergent properties and cascading processes as a consequence of interactions between risks is substantiated. It is established that systemic risk arises as a result of the development of multicomponent risk under conditions of interdependencies and cannot be represented by a simple sum of local risks. The scientific novelty is in the formalization of systemic risk as a non-additive property of a system of interacting risks. The practical significance of the obtained results is in the possibility of using them in the analysis of risks in critical infrastructure, the financial sector, payment systems, and other complex socio-technical systems.

Ke y w o r d s: multidimensional risk; systemic risk; risk interdependencies; emergence; cascading processes; socio-technical systems; critical infrastructure; operational resilience.

БАКАЛИНСЬКИЙ Олександр Олегович, канд. техн. наук, ст. дослідник, ст. наук. співробітник Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1993 р. закінчив Київський військовий інститут управління та зв'язку. Область наукових досліджень — системи управління інформаційною безпекою, управління ризиками інформаційної безпеки, кіберзахист об'єктів критичної інфраструктури.