

---

# СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

---

## SYSTEM ANALYSIS

УДК 355.58.0001:351.862.001:621.396.62  
DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.10>

### МОДЕЛЮВАННЯ ЗАГРОЗ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СИСТЕМНОЇ ДИНАМІКИ

---

**Невольніченко А. І.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник  
Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка  
ORCID ID: 0000-0002-6247-1970

**Чумаченко С. М.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій  
ORCID ID: 0000-0002-8894-4262

**Михайлова А. В.** – кандидат технічних наук, учений секретар Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту  
ORCID ID: 0000-0001-9440-4417

**Піріков О. В.** – кандидат технічних наук, доцент, експерт Громадської організації «Фундація розвитку екологічних та енергетичних ринків»  
ORCID ID: 0000-0002-7077-3645

**Мурасов Р. К.** – кандидат технічних наук, докторант Національного університету оборони України  
ORCID ID: 0000-0003-0800-2062

*В поданій науковій статті запропоновано один із підходів оцінювання загроз у сфері техногенної та екологічної безпеки, що полягає у застосуванні методу системної динаміки. Актуальність дослідження таких загроз підтверджується технічною зношеністю та застарілістю об'єктів критичної інфраструктури, небезпеками воєнного та терористичного характеру, кібератаками тощо. Зазначене може призвести до підвищення ймовірності виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури. Це у свою чергу може спричинити ескалацію та розвиток*

---

небезпечних сценаріїв техногенних аварій і катастроф з руйнуванням об'єктів критичної інфраструктури, виникненням екологічних наслідків для життя і здоров'я людей, що проживають на прилеглий території. У статті проведено аналіз нормативної бази та результатів досліджень вітчизняних науковців у галузі оцінювання загроз для об'єктів критичної інфраструктури. Авторами визначено, що одним із елементів забезпечення складової національної безпеки України є проведення моделювання загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури. В результаті аналітичного огляду наукових досліджень вітчизняних вчених зроблено висновок, що на теперішній час питання математичного і комп'ютерного моделювання загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури залишається фрагментарно невирішеним. У статті досліджено можливість імплементації підходу моделювання загроз у сфері техногенної та екологічної безпеки, які можуть стати причиною виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури, методом системної динаміки з використанням пуассонівських потоків. Авторами висловлено припущення, що застосування такого підходу дасть можливість забезпечувати підтримку прийняття рішень в системі запобігання та реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру.

**Ключові слова:** системна динаміка, моделювання, загроза, надзвичайна ситуація, об'єкт критичної інфраструктури, національна безпека, цивільний захист, техногенна безпека, екологічна безпека.

**Nevolnichenko A. I., Chumachenko S. M., Mykhailova A. V., Pyrikov O. V., Myrasov R. K. Modelling of threats of emergencies at critical infrastructure facilities using systemic dynamics method**

*The paper submitted proposes one of the approaches for the estimation of threats in the sphere of technical and ecological safety which lies in the application of systemic dynamics method. Actuality of studying such threats is confirmed by deterioration and obsolescence of critical infrastructure facilities, dangers of military and terrorist nature, cyber attacks etc. The aforementioned could lead to rising probability of emergencies of technical nature at critical infrastructure facilities. This in turn could cause escalation and development of dangerous scenarios of technical failures and catastrophes accompanied by destruction of critical infrastructure facilities and occurrence of negative ecological consequences for life and health of the persons dwelling at the adjacent territory. The paper analyses regulatory bases and results of the studies having been conducted by the domestic scientists in the sphere of estimation of threats for critical infrastructure facilities. The authors defined that one of the elements of ensuring the constituent part of the national safety of Ukraine was modelling of threats of emergencies at critical infrastructure facilities. As a result of analytical reviewing of the studies having been conducted by the domestic scientists we conclude that the issue of mathematical and computer modelling of threats of emergencies at critical infrastructure facilities remains partially unsolved today. The paper studies the possibility of implementation of the approach of modelling threats in the sphere of technical and ecological safety which could be the reason for emergencies at critical infrastructure facilities by systemic dynamics using Poisson flows. The authors expressed their vision that application of such an approach is to make it possible to provide some support for making decisions in the system of prevention and responding to emergencies of technical and natural character.*

**Key words:** systemic dynamics, modelling, threat, emergency, critical infrastructure, national safety, civil defense, technical safety, ecological safety.

**Постановка проблеми та її актуальність.** Аналіз сучасного стану досліджень в сфері оцінювання загроз у сфері техногенної та екологічної безпеки актуалізує пошук і впровадження інноваційних підходів для розроблення сучасних методів і засобів математичного моделювання для захисту критичної інфраструктури (далі – КІ). Зношеність та застарілість технічного стану об'єктів критичної інфраструктури (далі – ОКІ), воєнні, терористичні небезпеки, кібератаки тощо призводять до підвищення ймовірності виникнення надзвичайних ситуацій (далі – НС) на ОКІ. Це може спровокувати реалізацію небезпечних сценаріїв техногенних аварій і катастроф з руйнування КІ, спричинити загрозу для життя і здоров'я людей, що проживають на прилеглий території. Зважаючи на наведене вище, актуальною науковою проблемою сьогодення є організація й забезпечення ефективної підтримки прийняття рішень із застосуванням сучасних підходів щодо реагування

на загрози загроз у сфері техногенної та екологічної безпеки з метою підвищення рівня техногенної безпеки для захисту КІ.

Реалізація державної політики у сфері цивільного захисту в Україні забезпечується Єдиною державною системою цивільного захисту (далі – ЄДСЦЗ), безпосереднє керівництво якою здійснює Державна служба України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС). Одним із завдань ЄДСЦЗ є запобігання виникнення НС [1; 2]. Таким чином, сили і засоби цивільного захисту повинні бути спроможними до своєчасного реагування на можливі загрози у сфері техногенної та екологічної безпеки на ОКІ.

Пошук нових підходів під час проведення відповідних наукових досліджень потребує розвитку математичного і комп'ютерного імітаційного моделювання загроз виникнення НС на ОКІ, тому що надійне функціонування останніх стане запорукою забезпечення екологічної, техногенної і економічної складових національної безпеки України в сучасних геополітичних умовах. Застосування математичних методів і сучасних комп'ютерних технологій для оцінювання загроз і моделювання сценаріїв розвитку НС в КІ дозволять сформувати відповідну актуальну базу даних для проведення подальших досліджень, підвищити достовірність і об'єктивність отриманих наукових результатів, а також забезпечити готовність відповідних органів і підрозділів ДСНС щодо підтримки прийняття рішень для попередження НС на ОКІ, ефективного реагування та їх ліквідації.

#### **Аналіз нормативної бази, останніх досліджень та публікацій в сфері захисту КІ.**

З метою забезпечення положень національної безпеки [3] в розрізі забезпечення захищеності території, довкілля та населення від НС на ОКІ в Україні прийнято ряд нормативних документів, зокрема:

– Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» [4];

– Закон України «Про боротьбу з тероризмом» [5];

– Закон України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» [6];

У розвиток нормативної бази щодо захисту ОКІ в подальшому було затверджено Концепцію створення державної системи захисту критичної інфраструктури [7]. У Концепції зазначено, що державна система захисту КІ спрямована на забезпечення її стійкості до загроз усіх видів, в тому числі НС природного, техногенного характеру, а також загроз, спричинених протиправними діями, тощо.

Особливої уваги заслуговує Закон України «Про критичну інфраструктуру» [8], який був прийнятий наприкінці минулого року. Цей документ визначає правові та організаційні засади створення і функціонування національної системи захисту КІ. Таким чином, з прийняттям зазначеного вище нормативного документу на сьогодні узаконено: понятійний апарат системи КІ; засади державної політики у сфері захисту КІ; завдання державної політики у сфері захисту КІ, а також критерії для віднесення об'єктів до КІ тощо.

Вивчення питань оцінки загроз у сфері техногенної та екологічної безпеки щодо захисту КІ в Україні знайшло в роботах таких вітчизняних вчених, як Д. Бірюков [9-11], Д. Бобро [12], П. Волянський [13], В. Євсєєв [14], Резнікова О.О. [15], О. Лисенко [16], І. Уряднікова [17], С. Чумаченко [18-21] та інші.

У роботі [12] автор проводить аналіз сучасних методологічних підходів до оцінки критичності об'єктів інфраструктури та пропонує трирівневу ієрархічну модель критеріїв її визначення. З урахуванням невизначеності, неточності та неповноти інформації, необхідної для коректної оцінки загроз та ризиків критичній інфраструктурі,

проводиться оцінка багатовимірності можливих наслідків, при цьому необхідність урахування численних взаємозв'язків та взаємозалежностей ОКІ, універсальність оцінки критичності може забезпечити застосування методів нечіткої логіки та експертних оцінок. Запропонована автором тривірнева ієрархічна модель критеріїв визначення критичності інфраструктури дозволяє обґрунтувати пропозиції щодо подальших кроків з розбудови в Україні державної системи захисту КІ.

В монографії [13] колективом авторів проведено аналіз стану безпеки ОКІ та феноменологічне моделювання сценаріїв впливу НС на сталі функціонування КІ; здійснено класифікацію ризиків функціонування КІ в умовах НС та обґрунтування методики оцінювання ризиків функціонування КІ та збитків від НС. В статті [14] проведено аналіз досвіду захисту КІ в провідних країнах світу та наведено можливі шляхи вдосконалення її захисту в Україні.

Аналітичний огляд [15] висвітлює підходи до оцінювання ризиків і загроз для національних систем Великобританії, Нідерландів, Нової Зеландії та США, в тому числі і для КІ, з використанням експертних методів. У матеріалах статті [16] надається розгорнутий огляд найбільш поширених підходів щодо формування стратегій управління ризиками на ОКІ, при виборі стратегії в умовах невизначеності пропонується використання різних критеріїв, що враховують фактороформуючі установки й обмеження щодо умов його життєдіяльності людей та інших обставин. Також авторами надається розгорнутий аналіз застосування критеріїв Вальда, Лапласа, Севіджа.

Водночас, незважаючи на значний інтерес та проведені дослідження вітчизняних науковців за цим напрямом питання математичного і комп'ютерного моделювання загроз виникнення НС на ОКІ досі залишається фрагментарно невирішеним.

**Метою цієї роботи** є дослідження можливості імплементації підходу моделювання техногенно-екологічних загроз виникнення НС на ОКІ методом системної динаміки для забезпечення підтримки прийняття рішень в системі попередження та реагування на НС техногенного та природного характеру.

**Основні результати досліджень.** Системний підхід до вивчення ОКІ, складається з [22-26]:

- визначення утворюючих її складових частин –  $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$  і взаємодіючих з нею об'єктів навколишнього середовища –  $S_1, S_2, \dots, S_k$ ;
- встановлення структури, тобто сукупності внутрішніх зв'язків і відносин КІ, а також зв'язків між ОКІ і навколишнім середовищем  $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_r$ ;
- побудови функцій (законів функціонування) системи КІ  $F$ , що визначає характер зміни компонентів системи КІ і зв'язків між ними під дією зовнішніх об'єктів  $S_1(t), S_2(t), \dots, S_k(t)$ .

Елементи КІ  $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$ , які пов'язані між собою різними зв'язками і відносинами, називаються системоутворюючими, тому що саме їхня наявність перетворює набір елементів у цілісну систему КІ.

З формальної точки зору система ОКІ впливає сама і зазнає впливу з боку незліченної кількості зовнішніх стосовно неї систем  $S_1, S_2, \dots, S_m$ . Однак, обравши поріг визначеної міри інтенсивності впливу, можна встановити кінцеве число зовнішніх систем  $S_1, S_2, \dots, S_k, k < m$ , що знаходяться з даною системою КІ у взаємодії з інтенсивністю не меншою певного заданого порогу:

$$\text{OKI} = \{\Gamma, V, \Sigma, F\}, \quad (1)$$

де  $\Gamma = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3\}$  – внутрішні елементи системи КІ;  $V = \{S_1, S_2, S_3\}$  – зовнішні системи;  $\Sigma = \{\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4, \Sigma_5, \Sigma_6, \Sigma_7, \Sigma_8, \Sigma_9\}$  – структурні зв'язки;  $F$  – функція перетворення параметрів і структури.

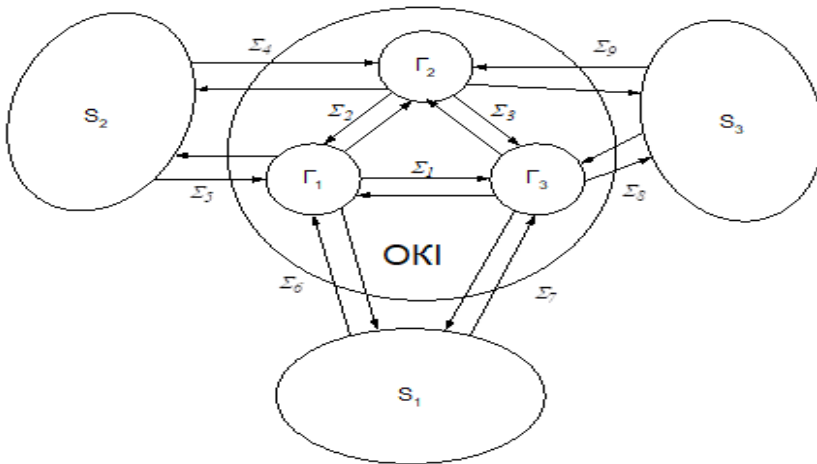


Рис. 1. Принципова схема системи КІ з трьох елементів як приклад простору

Однак крім того, що ці елементи КІ пов'язані між собою, на них впливають зовнішні об'єкти, а вони, в свою чергу, самі впливають на них. Це призводить до необхідності залучення поняття про навколишнє середовище як по відношенню до системи КІ, так і до підсистем, що входять до її складу.

Множину, що складається з усіх зовнішніх систем, які знаходяться в істотному зв'язку (у вищезазначеному розумінні) з даною системою КІ, назовемо безпосереднім зовнішнім середовищем і позначимо:

$$V = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}. \quad (2)$$

Множину зв'язків (відносин) елементів системи КІ між собою, а також елементів цієї системи з зовнішнім середовищем назовемо структурою системи КІ, яку можна представити у такому вигляді:

$$\Sigma = \{\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_r\}, \quad (3)$$

де  $r$  – число всіх розглянутих зв'язків, що утворюють структуру системи КІ. Зовнішнє середовище, склад і структура КІ можуть змінюватися з часом:

$$\begin{cases} \Gamma(t) = \{\Gamma_1(t), \Gamma_2(t), \dots, \Gamma_n(t)\} \\ V(t) = \{S_1(t), S_2(t), \dots, S_k(t)\}. \\ \Sigma(t) = \{\Sigma_1(t), \Sigma_2(t), \dots, \Sigma_r(t)\} \end{cases} \quad (4)$$

Функцією КІ називається закон (сукупність правил)  $F$ , за яким в залежності від зовнішніх факторів  $V(t)$  відбувається зміна в часі внутрішніх елементів  $\Gamma(t)$  і структури  $\Sigma(t)$  системи КІ.

Остаточного математичного визначення поняття КІ набуває змісту простору  $KI(t) = \{V(t), X(t), \Sigma(t), F\}$ , який складається із ряду елементів систем  $\Gamma(t)$ , зовнішніх систем  $V(t)$ , сукупності зв'язків  $\Sigma(t)$  та функції параметричних і структурних змін в  $\Gamma(t)$  та  $\Sigma(t)$ .

Розглянемо безпеку КІ як стохастичну систему, яка може перебувати в таких станах (рисунок 2):

$S_{\text{пб}}$  – стан, за якого ОКІ здатен відвернути неприпустимі для його існування збитки власним ресурсом (ознака стану – «повна безпека»);

$S_{\text{пн}}$  – стан, за якого ОКІ не здатен відвернути неприпустимі для його існування потенційні збитки власним ресурсом (ознака стану – «потенційна небезпека»);

$S_{pn}$  – стан, за якого ОКІ не здатен відвернути неприпустимі для його існування реальні збитки власним ресурсом (ознака стану – «реальна небезпека»).

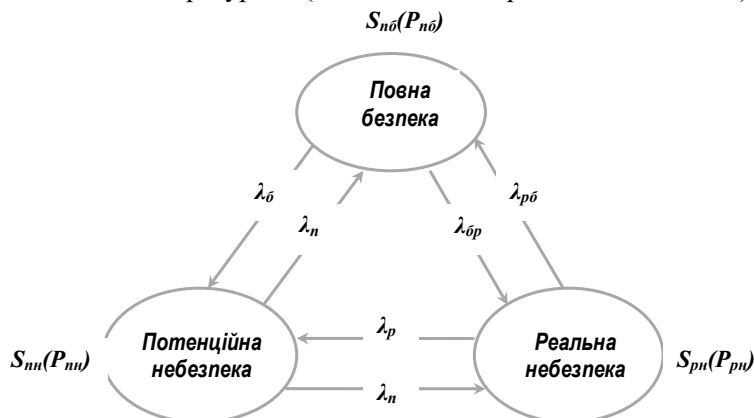


Рис. 2. Граф станів й переходів стохастичної системи КІ

Множина цих станів складає так звану «повну групу», для якої сума ймовірностей перебування КІ в кожному відповідному стані ( $P_{пб}$ ,  $P_{пн}$ ,  $P_{рн}$ ) дорівнює одиниці.

У поточний момент часу КІ може перебувати в одному з перелічених станів, змінюючи їх випадковим чином як за «напрямком», так і за «моментом часу», за дією потоків випадкових подій:

- «виникнення реальної загрози» з темпом у часі  $\lambda_{он}$ ;
- «усунення реальної загрози» з темпом у часі  $\lambda_{рб}$ ;
- «виникнення потенційної загрози» з темпом у часі  $\lambda_{бп}$ ;
- «усунення потенційної загрози» з темпом у часі  $\lambda_{пб}$ ;
- «перетворення потенційної загрози в реальну» з темпом у часі  $\lambda_{пн}$ ;
- «перетворення реальної загрози в потенційну» з темпом у часі  $\lambda_{рп}$ .

Потоки подій із «загрозами виникнення НС» вважаються пуассонівським, причому інтенсивності подій виникнення (чи збільшення ймовірності виникнення) НС визначаються зовнішніми факторами, а події ліквідації (чи зменшення ймовірності виникнення) НС – внутрішніми факторами, пов'язаними з можливостями системи щодо середніх витрат часу  $\tau$  на ліквідацію реальної (чи потенційної) НС:

$$\lambda_{рб} = (1/\tau_{рб}); \lambda_{пб} = (1/\tau_{пб}); \lambda_{рп} = (1/\tau_{рп}). \quad (5)$$

Тому КІ з розглянутим внутрішнім процесом зміни станів типу «ланцюг Маркова з неперервним часом» слід вважати стохастичною системою щодо її функціональної стійкості. Проаналізуємо дану стохастичну систему.

Користуючись графом станів і переходів (рисунок 2), складемо систему диференціальних рівнянь (рівняння Колмогорова) для темпів (швидкості у часі) зміни ймовірностей станів ( $S_{пб}$ ,  $S_{пн}$ ,  $S_{рн}$ ) за умови зміни станів з відомими темпами переходів ( $\lambda$ ) для системи:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{пб}}{dt} &= -(\lambda_{бп} + \lambda_{рб}) \cdot p_{пб}(t) + \lambda_{пб} \cdot p_{пн}(t) + \lambda_{рб} \cdot p_{рн}(t) \\ \frac{dp_{пн}}{dt} &= \lambda_{бп} \cdot p_{пб}(t) - (\lambda_{пб} + \lambda_{рп}) \cdot p_{пн}(t) + \lambda_{рп} \cdot p_{рн}(t) \\ \frac{dp_{рн}}{dt} &= \lambda_{рб} \cdot p_{пб}(t) + \lambda_{рп} \cdot p_{пн}(t) - (\lambda_{рб} + \lambda_{рп}) \cdot p_{рн}(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Запишемо умову стаціонарності процесу переходів (для  $t \rightarrow \infty$ ), коли похідні за часом стають рівними нулю і поточні ймовірності станів досягають відповідних асимптотичних значень ( $P_{\bar{n}\bar{o}}, P_{nn}, P_{pn}$ ), тобто:

$$\begin{aligned}(\lambda_{\bar{o}n} + \lambda_{\bar{o}p})P_{\bar{n}\bar{o}} + \lambda_{n\bar{o}}P_{nn} + \lambda_{p\bar{o}}P_{pn} &= 0 \\ \lambda_{\bar{o}n}P_{\bar{n}\bar{o}} - (\lambda_{n\bar{o}} + \lambda_{np})P_{nn} + \lambda_{pn}P_{pn} &= 0 \\ \lambda_{\bar{o}p}P_{\bar{n}\bar{o}} + \lambda_{np}P_{nn} - (\lambda_{p\bar{o}} + \lambda_{pn})P_{pn} &= 0.\end{aligned}\quad (7)$$

Дана система лінійних рівнянь є лінійно залежною, оскільки сума будь-яких двох з них дорівнює третьому. Тому виключимо з даної системи, наприклад, останнє (третє) рівняння, натомість додамо рівняння умови повноти цієї множини станів для їх ймовірності. У результаті цього отримаємо таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned}(\lambda_{\bar{o}n} + \lambda_{\bar{o}p})P_{\bar{n}\bar{o}} + \lambda_{n\bar{o}}P_{nn} + \lambda_{p\bar{o}}P_{pn} &= 0 \\ \lambda_{\bar{o}n}P_{\bar{n}\bar{o}} - (\lambda_{n\bar{o}} + \lambda_{np})P_{nn} + \lambda_{pn}P_{pn} &= 0 \\ P_{\bar{o}} + P_n + P_p &= 1\end{aligned}\quad (8)$$

Вирішуємо дану систему рівнянь (наприклад, методом Крамера). Детермінант системи матиме такий вигляд:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -(\lambda_{\bar{o}n} + \lambda_{\bar{o}p}) & \lambda_{n\bar{o}} & \lambda_{p\bar{o}} \\ \lambda_{\bar{o}n} & -(\lambda_{n\bar{o}} + \lambda_{np}) & \lambda_{pn} \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

часткові детермінанти (для стовпчика «вільних» членів системи рівнянь) відповідно матимуть такий вигляд:

$$\Delta_{\bar{o}} = \begin{vmatrix} 0 & \lambda_{n\bar{o}} & \lambda_{p\bar{o}} \\ 0 & -(\lambda_{n\bar{o}} + \lambda_{np}) & \lambda_{pn} \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} -(\lambda_{\bar{o}n} + \lambda_{\bar{o}p}) & 0 & \lambda_{p\bar{o}} \\ \lambda_{\bar{o}n} & 0 & \lambda_{pn} \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad (11)$$

$$\Delta_p = \begin{vmatrix} -(\lambda_{\bar{o}n} + \lambda_{\bar{o}p}) & \lambda_{n\bar{o}} & 0 \\ \lambda_{\bar{o}n} & -(\lambda_{n\bar{o}} + \lambda_{np}) & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Остаточню вирішенням цієї системи рівнянь є асимптотичні позначення ймовірності перебування системи КІ в кожному стані:

$$P_{\bar{n}\bar{o}} = (\Delta_{\bar{o}} / \Delta), \quad P_{nn} = (\Delta_n / \Delta), \quad P_{pn} = (\Delta_p / \Delta). \quad (13)$$

Саме значення ймовірності  $P_{\bar{n}\bar{o}}$  слід вважати оцінкою живучості, а значення  $P_{pn}$  – оцінкою вразливості системи.

Якщо дана КІ має оперативно-стратегічну важливість AS, то завдяки повноті групи подій (станів безпеки та небезпеки КІ) математичне сподівання збитків, яких вдасться не допустити, становитиме:

$$VS = P_{\bar{o}n} \times AS \quad (14)$$

а математичне сподівання нанесених збитків (потенціальний та реальний ризик):

$$WS_{nn} = P_{nn} \times AS; WS_{pn} = P_{pn} \times AS. \quad (15)$$

**Висновки.** У роботі вивчено та проаналізовано державну нормативну базу, а також дослідження вітчизняних вчених щодо сучасного стану вивчення питання оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури. Виявлено, що з метою оцінювання загроз виникнення надзвичайних ситуацій на таких об'єктах та недопущення аварійних станів в системі критичної інфраструктури в цілому доцільне проведення досліджень щодо створення максимально ефективної системи підтримки прийняття рішень щодо забезпечення техногенно-екологічної безпеки критичної інфраструктури. Авторами запропоновано підхід моделювання загроз методом системної динаміки, який і визначає у специфічній для нього інтерпретації об'єкт, мету, предмет та науковий апарат дослідження. Імплементация такого підходу дасть можливість забезпечити належну готовність відповідних органів та підрозділів ДСНС до реагування на надзвичайні ситуації та їх подальшу ефективну ліквідацію.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17/stru#Stru> (дата звернення 19.05.2022).
2. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту: Постанова Кабінету Міністрів України від 09.01.2014 № 11 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text> (дата звернення 01.10.2021).
3. Про національну безпеку України: Закон України від 21.06.2018 № 122 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text> (дата звернення 19.05.2022).
4. Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання: Закон України від 19.10.2000 № 2064-III // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14#Text> (дата звернення 18.05.2022).
5. Про боротьбу з тероризмом: Закон України від 20.03.2003 № 638-IV // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/638-15#Text> (дата звернення 18.05.2022).
6. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України: Закон України від 05.10.2017 № 2163-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text> (дата звернення 19.05.2022).
7. Про схвалення Концепції створення державної системи захисту критичної інфраструктури: розпорядженням Кабінету Міністрів України від 6.12.2017 № 1009-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1009-2017-%D1%80#Text> (дата звернення 17.05.2022).
8. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text> (дата звернення 17.05.2022).
9. Бірюков Д. С., Кондратов С. І. Захист критичної інфраструктури: проблеми та перспективи впровадження в Україні : аналітична доповідь. Київ : НІСД, 2012. 57 с. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/zakhist-kritichnoi-infrastrukturi-problemi-ta-perspektivi>



10. Іванюта С.П. Загрози критичній інфраструктурі та їх вплив на стан національної безпеки: Аналітична записка. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2017-03/KI\\_Ivanyuta-3a331.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2017-03/KI_Ivanyuta-3a331.pdf) (дата звернення 17.02.2022).

11. Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні: збірник матеріалів міжнародних експертних нарад / упоряд. Д. С. Бірюков, С.І. Кондратов; за заг. ред. О. М. Суходолі. К. : НІСД, 2015. 176 с.

12. Бобро Д. Г. Визначення критеріїв оцінки та загрози критичній інфраструктурі / Стратегічні пріоритети. Серія «Економіка». 2015. № 4 (37). С. 83-93. URL: <http://sp.niss.gov.ua/content/articles/files/10-1457002140.pdf>. (дата звернення 17.02.2022)

13. Захист критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій: Монографія / С. І. Азаров, В. Л. Сидоренко, С. А. Єременко, А. В. Пруський, А. М. Демків; за заг. ред. П. Б. Волянського. К., 2021. 375 с.

14. Євсєєв В. О. Можливі шляхи удосконалення захисту критичної інфраструктури України з урахуванням світового досвіду / Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2016. № 4 (49). С. 168-172.

15. Національні системи оцінювання ризиків і загроз: краді світові практики, нові можливості для України: Аналітична доповідь / О. О. Резнікова, К. Є. Войтовський, А. В. Лепіхов; за заг. ред. О. О. Резнікової. НІСД, 2020. – 84 с.

16. Лисенко О. І., Чеканова І. В., Кутовий О. П., Нікітін В. А. Стратегії управління ризиками на об'єктах критичної інфраструктури в умовах невизначеності. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2015. № 1(31). С. 134–139. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb\\_2015\\_1\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2015_1_18). (дата звернення: 18.02.2022).

17. Уряднікова І. В., Чумаченко С. М., Кармазін С. В., Тесленко О. М. Застосування експертно-аналітичних методів для оцінювання ризиків надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури. Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. 2015. Вип. 1. С. 206-218. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvam\\_u\\_teh\\_2015\\_1\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvam_u_teh_2015_1_24). (дата звернення: 18.02.2022).

18. Чумаченко С. М., Троцько В. В. Оцінювання загроз об'єктам критичної інфраструктури. Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. 2017. № 1. С. 41-47. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcspf\\_2017\\_1\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcspf_2017_1_8). (дата звернення: 16.02.2022).

19. Чумаченко С. М., Кутовий О. П., Михайлова А.В. Застосування експертно-аналітичних методів для оцінювання загроз об'єктам критичної інфраструктури оборонно-промислового комплексу на сході України. Науковий журнал «Інженерія природокористування». 4 (18) 2020. С. 114-123. URL: DOI: [https://doi.org/10.37700/enm.2020.4\(18\).114-123](https://doi.org/10.37700/enm.2020.4(18).114-123). (дата звернення: 25.01.2022).

20. Чумаченко С. М., Парталян А. С., Туровець Ю. С. Система підтримки прийняття рішень з управління екологічними загрозами у районі ведення бойових дій // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського. № 1 (83). Київ: ЦНДІ ЗС України, 2018. С. 88–95. (дата звернення: 30.01.2022).

21. Кодрик А. І., Яковлев Є. О., Чумаченко С. М., Парталян А. С. Методичні підходи до геоінформаційного аналізу еколого-техногенних загроз для вуглепромислових районів Донбасу (на прикладі ПАО «Лисичанськвугілля») та ДП «Первомайськвугілля»). Математичне моделювання в економіці. Міжнародний науковий журнал. № 4 (13) 2018. С. 5-20. URL: DOI: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmve\\_2018\\_4\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmve_2018_4_3). (дата звернення: 10.02.2022).

22. Качинський А. Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи / А. Б. Качинський. К. : Ін-т пробл. нац. безпеки, 2004. – 472 с.

23. Воєнно-наукове забезпечення операцій військ (сил): Монографія / Г. М. Педченко, А. І. Невольніченко, В. І. Шарий. Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К.: 2011. 340 с.

24. Шарий В.І. Проблематика керування сферою воєнної безпеки / В. І. Шарий, А. І. Невольниченко. *Наука і оборона*. 2000. № 1. С. 16–21.

25. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. Інститут проблем національної безпеки: Монографія / Качинський А. Б. Національної академії СБУ. К. 2004. 472 с.

26. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах / Горелик В. А., Кононенко А. Ф. Радио и связь. М., 1982. 144 с.

#### REFERENCES:

1. Kodeks tsivilnogo zahistu Ukrayini: Zakon Ukrayini vid 02.10.2012 #5403-VI // Baza danih «Zakonodavstvo Ukrayini» / Verhovna Rada Ukrayini. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/5403-17> [Code of Civil Protection of Ukraine: Law of Ukraine dated 02.10.2012 # 5403-VI // Database «Legislation of Ukraine» / The Verkhovna Rada of Ukraine]. (data zvernennia: 28.08.2021) [in Ukrainian].

2. Pro zatverdzhennya Polozhennya pro Edinu derzhavnu sistemu tsivilnogo zahistu: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayini vid 09.01.2014 # 11. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text>. [On approval of the Regulation on the unified state system of civil protection: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 09.01.2014 № 11]. (data zvernennia: 01.10.2021) [in Ukrainian].

3. Zakon Ukrainy Pro natsionalnu bezpeku Ukrainy [On the national security of Ukraine] # 122 (2018) (Verkhovna Rada Ukrainy) Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19> (data zvernennia 18.05.2022) [in Ukrainian].

4. Zakon Ukrainy Pro fizychnyi zakhyst yadernykh ustanovok, yadernykh materialiv, radioaktyvnykh vidkhodiv, inshykh dzherel ionizuiuchoho vyprominiuvannia [About physical protection of nuclear installations, nuclear materials, radioactive waste, other sources of ionizing radiation], # 2064-III (2000) (Verkhovna Rada Ukrainy). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14#Text> (data zvernennia 18.05.2022) [in Ukrainian].

5. Zakon Ukrainy Pro borotbu z teroryzmozom [On the fight against terrorism], # 638-IV (2003) (Verkhovna Rada Ukrainy). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/638-15#Text> (data zvernennia 18.05.2022) [in Ukrainian].

6. Zakon Ukrainy Pro osnovni zasady zabezpechennia kiberbezpeky Ukrainy [On the basic principles of cybersecurity in Ukraine ], # 2163-VIII (2017) (Verkhovna Rada Ukrainy). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text> (data zvernennia 19.05.2022) [in Ukrainian].

7. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro skhvalennia Kontseptsii stvorennia derzhavnoi systemy zakhystu krytychnoi infrastruktury [About approval of the Concept of creation of the state system of protection of critical infrastructure], # 1009-p (2017) (Verkhovna Rada Ukrainy). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1009-2017-p#Text> (data zvernennia 18.05.2022) [in Ukrainian]

8. Zakon Ukrainy Pro krytychnu infrastrukturu [About critical infrastructure], # 1882-IX (2021) (Verkhovna Rada Ukrainy). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text> (data zvernennia 17.05.2022) [in Ukrainian]

9. Biriukov, D. S., & Kondratov, S. I. (2012). Zakhyst krytychnoi infrastruktury: problemy ta perspektyvy vprovadzhennia v Ukraini [Protection of critical infrastructure: problems and prospects for implementation in Ukraine]. Kyiv: NISD [in Ukrainian] Retrieved from; <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/zakhyst-krytychnoi-infrastruktury-problemi-ta-perspektivi> (data zvernennia 17.02.2022).

10. Ivaniuta S.P. (2017) Zahrozy krytychnii infrastrukturi ta yikh vplyv na stan natsionalnoi bezpeky [Threats to critical infrastructure and their impact on national security]: Analitichna zapyska. [Elektronnyi resurs]. – Retrieved from: [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2017-03/KI\\_-Ivanyuta-3a331.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2017-03/KI_-Ivanyuta-3a331.pdf) [in Ukrainian].

11. Sukhodolia, O. M. (Ed.). (2015). Zelena knyha z pytan zakhystu krytychnoi infrastruktury v Ukraini: zbirnyk materialiv Mizhnarodnykh ekspertnykh narad [Green

Paper on Critical Infrastructure Protection in Ukraine: a collection of materials of International Expert Meetings]. Compilers D. S. Biriukov, S. I. Kondratov. Kyiv: NISD [in Ukrainian].

12. Bobro, D. H. (2015). Vyznachennia kryteriiv otsinky ta zahrozy krytychnii infrastrukturi [Defining criteria for assessing and threatening critical infrastructure]. *Stratehichni priorytety. Seriya «Ekonomika»*, 4 (37), 83-93 [in Ukrainian].

13. Azarov, S. I., Sydorenko, V. L., Yeremenko, S. A., Pruskyi, A. V., & Demkiv, A. M. (2021). Zakhyst krytychnoi infrastruktury v umovakh nadzvychainykh sytuatsii [Protection of critical infrastructure in emergency situations]. *Monohrafiia (P. B. Volianskoho, red.)*, 375. [in Ukrainian].

14. Yevsieiev, V. O. (2016). Mozhlyvi shliakhy udoskonalennia zakhystu krytychnoi infrastruktury Ukrainy z urakhuvanniam svitovoho dosvidu [Possible ways to improve the protection of critical infrastructure of Ukraine, taking into account world experience]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*, 4 (49), 168–172. [in Ukrainian].

15. Reznikova, O. O., Voitovskyi, K. Y., & Lepikhov, A. V. (2020). Natsionalni systemy otsiniuvannia ryzykiv i zahroz: Krashchi svitovi praktyky, novi mozhlyvosti dlia Ukrainy [National risk and threat assessment systems: world best practices, new opportunities for Ukraine]: *Analitychna dopovid (za zah. red. O. O. Reznikovoi)*. NISD. 84. [in Ukrainian].

16. Lysenko, O. I., Chekanova, I. V., Kutovyi, O. P., & Nikitin, V. A. *Stratehii upravlinnia ryzykamy na ob'ekтах krytychnoi infrastruktury v umovakh nevyznachenosti* [Risk management strategies at critical infrastructure facilities in conditions of uncertainty]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 1(31), 134–139. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb\\_2015\\_1\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2015_1_18). [in Ukrainian].

17. Uriadnikova, I. V., Chumachenko, S. M., Karmazin, S. V., & Teslenko, O. M. (2015). Zastosuvannia ekspertno-analitychnykh metodiv dlia otsiniuvannia ryzykiv nadzvychainykh sytuatsii na ob'ekтах krytychnoi infrastruktury [Application of expert-analytical methods to assess the risks of emergencies at critical infrastructure]. *Naukovyi visnyk Akademii munitsypalnoho upravlinnia. Seriya: Tekhnika.*, (1), 206–218. Retrieved from: URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvamu\\_teh\\_2015\\_1\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvamu_teh_2015_1_24). [in Ukrainian].

18. Chumachenko, S. M., & Trotsko, V. V. (2017). Otsiniuvannia zahroz ob'ektam krytychnoi infrastruktury [Critical Infrastructure Threat Assessment]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1, 41–47. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcps\\_2017\\_1\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcps_2017_1_8). (data zvernennia: 16.02.2022) [in Ukrainian].

19. Chumachenko, S. M., Kutovyi, O. P., & Mykhailova, A. (2020). Zastosuvannia ekspertno-analitychnykh metodiv dlia otsiniuvannia zahroz ob'ektam krytychnoi infrastruktury oboronno-promysloвого kompleksu na skhodi Ukrainy [Application of expert-analytical methods for threat assessment of critical infrastructure of the defense-industrial complex in eastern Ukraine]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, 4 (18), 114–123. Retrieved from: [https://doi.org/10.37700/enm.2020.4\(18\).114-123](https://doi.org/10.37700/enm.2020.4(18).114-123). (data zvernennia: 25.01.2022) [in Ukrainian].

20. Chumachenko, S. M., Partalian, A. S., & Turovets, Y. S. (2018). Systema pidtrymky pryiniattia risheh z upravlinnia ekolohichnymy zahrozamy u raioni vedennia boiovykh dii [Decision support system for environmental threat management in the area of hostilities]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho*, 1 (83), 88–95. [in Ukrainian].

21. Kodryk, A. I., Yakovliev, Y. O., Chumachenko, S. M., & Partalian, A. S. (2018). *Metodychni pidkhody do heoinformatsiinoho analizu ekoloho-tekhnohennykh zahroz dlia vuhlepromyslovykh raioniv donbasu (na prykladi PAO «lysvchanskvuhillia» ta DP «pervomaiskvuhillia»)* [Methodical approaches to geoinformation analysis of ecological and man-made threats for coal-mining areas of Donbass (on the example of

PJSC "Lysychansk Coal" and SE "Pervomaisk Coal"). Matematychni modeliuvannia v ekonomitsi. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal, 4 (13), 5–20. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmve\\_2018\\_4\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmve_2018_4_3) [in Ukrainian].

22. Kachynskiy, A. B. (2004). Bezpeka, zahrozy i ryzyk: Naukovi kontseptsii ta matematychni metody [Security, threats and risks: scientific concepts and mathematical methods]. Kyiv: In-t probl. nats. bezpeky.472 [in Ukrainian].

23. Pedchenko, H. M., A. I. Nevolnichenko, A. I., & Sharyi, V. I. (2011). Voinno-naukove zabezpechennia operatsii viisk (syl) [Military-scientific support of operations of troops (forces)]. Monohrafiia. Viiskovyi instytut Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. 340 [in Ukrainian].

24. Sharyi, V. I., & Nevolnichenko, A. I. (2000). Problematyka keruvannia sferoiu voiennoi bezpeky [Problems of military security management ]. Nauka i oborona, 1, 16–21. [in Ukrainian].

25. Kachynskiy A. B. (2004). Bezpeka, zahrozy i ryzyk: Naukovi kontseptsii ta matematychni metody [Security, threats and risks: scientific concepts and mathematical methods.]. Monohrafiia Instytut problem natsionalnoi bezpeky Natsionalnoi akademii SBU. [in Ukrainian].

26. Gorelik, V. A., & Kononenko, A. F. (1982). Teoretiko-igrovyi modeli prinyatiya reshenij v ekologo-ekonomicheskikh sistemah [Game-Theoretic Decision-Making Models in Ecological-Economic Systems] . Radio I Svyaz, 144. [in Russian].