

УДК 622.83

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/18>

Мурасов Р.К.

Національний університет оборони України

Чумаченко С.М.

Національний університет харчових технологій

Пиріков О.В.

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Ківа І.Л.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАГРОЗ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

У роботі досліджується проблема побудови математичної моделі оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури. Актуальність проблеми оцінювання загроз зумовлена насамперед складною обстановкою на сході України, де значна їх кількість знаходиться у зоні впливу гібридного збройного конфлікту. Як наслідок, система захисту критичної інфраструктури не в змозі у повному обсязі виконувати покладені на неї завдання, що надалі може призвести до значних людських жертв серед населення та небойових втрат серед військовослужбовців.

З використанням класичної теорії графів було запропоновано підхід до побудови математичної моделі оцінювання загроз для об'єктів критичної інфраструктури. Ця модель дозволяє розрахувати можливі варіанти розвитку техногенних аварій і прогнозувати варіанти розвитку подій. Було побудовано та зроблено експрес-аналіз узагальненої моделі сценаріїв гіпотетичного розвитку надзвичайних ситуацій (НС) внаслідок ураження об'єктів критичної інфраструктури (КІ), в результаті чого оцінено стійкість об'єктів до впливу дестабілізуючих чинників і небезпечних впливів.

Результати експрес-аналізу показали достовірність та адекватність запропонованої методики.

Модель оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури доцільно застосовувати при визначенні і оцінці ризиків та загроз потенційно небезпечним об'єктам КІ. Вона дозволяє враховувати усі необхідні фактори, досліджувати складні системи критичної інфраструктури і визначати напрямки щодо прогалин спроможностей для системи захисту об'єктів КІ і ліквідації наслідків у разі техногенних аварій і катастроф.

У статті здійснено топологічний експрес-аналіз узагальненої моделі сценарію розвитку НС внаслідок ураження об'єктів критичної інфраструктури на Сході України, який показав достатню здатність критичної інфраструктури протидіяти зовнішнім деструктивним впливам і її вразливість перед чинниками гібридної війни та терористичних актів.

Ключові слова: модель складної системи, стійкість системи, теорія графів, критична інфраструктура, комбінаторний аналіз, оцінювання загроз, топологія структури системи.

Постановка проблеми. Актуальність проблеми оцінювання загроз обумовлена в першу чергу складною обстановкою на сході України, де значна їх кількість знаходиться у зоні впливу гібридного збройного конфлікту. Для складних організаційно-технічних систем, до яких також належать об'єкти критичної інфраструктури (системи електроживлення й енергопостачання, водопостачання та водовідведення, об'єкти гір-

ничо-добувної, хімічної та металургійної промисловості, система газо-, нафто- і продуктопроводів і т.ін.), актуальною проблемою є об'єктивне, достовірне та своєчасне прогнозування і попередження надзвичайних ситуацій (НС) і каскадних ефектів, що можуть призвести до техногенних аварій, катастроф або суттєво вплинути на їх функціональність, живучість, безпеку, ефективність та інші властивості. Ймовірність виникнення та наслідки

таких НС, умов і чинників визначаються цілеспрямованими (диверсія, бойові дії, саботаж) або стохастичними процесами, що за своєю сутністю характеризуються як воєнно-техногенні загрози.

Одним із перспективних напрямів дослідження щодо оцінки воєнно-техногенних загроз для об'єктів критичної інфраструктури (КІ) у зоні проведення ООС є аналіз кризових ситуацій, коли система захисту критичної інфраструктури не в змозі у повному обсязі виконувати покладені на неї завдання, що надалі можуть призвести до значних людських жертв серед населення та небойових втрат серед військовослужбовців. При дії на систему КІ зовнішніх уражуючих чинників, які можуть бути раптовими й інтенсивними, система захисту КІ не в змозі їм протидіяти, що призведе до кризових ситуацій або значного погіршення їх функціональної стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час аналізу останніх публікацій [1–3; 11], що стосуються математичних підходів до оцінювання загроз і ризиків, було виявлено недостатній розвиток їх математичного і комп'ютерного моделювання для об'єктів КІ. Головним чином автори використовують системний підхід із використанням експертних оцінок.

За думкою багатьох експертів [4; 6; 7], нині не існує загальноприйнятої методики оцінки ризиків для об'єктів КІ, є часткові рішення для конкретних об'єктів (випадків) [8–10].

Постановка завдання. Тому метою статті є розробка підходів до побудови моделі оцінювання загроз і ризиків із використанням математичної моделі сценаріїв каскадних ефектів, побудованої на основі теорії оргграфів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Структура математичної моделі оцінювання загроз і ризиків для об'єктів КІ наведена на рис. 1.

Символами X, Y, Z представлено вектори станів об'єктів критичної інфраструктури (кількість векторів необмежена та залежить від чинників що впливають на КІ). Функція f представляє собою науково-методичний апарат, який дозво-

ляє отримати прогностичну оцінку загроз і ризиків для об'єктів КІ R , що поєднує множини станів об'єктів критичної інфраструктури. Моделювання комбінацій загроз і ризиків з метою складання загальної оцінки можливих негативних наслідків і соціо-еколого-економічних збитків і втрат дозволить чітко визначити та упорядкувати чітку ієрархію можливих загроз і розробити своєчасне управлінське рішення що попередження та нейтралізації загроз об'єктам КІ.

Розглянемо сценарії розвитку подій, наведених у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики вершин v_i оргграфа $G(V, R)$

№	Опис події
1	Прорив дамби шламонакопичувача
2	Затоплення села Красногорівка
3	Загибель людей і сільських тварин
4	Забруднення значної території відходами зі шламонакопичувача
5	Забруднення річок Кам'янка й Очеретувата та р. Кривий Торець
6	Забруднення басейну річки Сіверський Донець
7	Транскордонне забруднення басейну нижнього Дону
8	Затоплення села Веселе
9	Влучення снаряду в хімічний накопичувач
10	Руйнування гідро бар'єру
11	Вторинне забруднення ґрунтових вод
12	Вторинне забруднення шламонакопичувача хім. речовинами з хім. накопичувача
13	Виникнення пожежі на хім. накопичувачі
14	Виникнення пожежі на породному відвалі
15	Забруднення приземного шару повітря
16	Задимлення прилеглої території (залізничного полотна і полігону тв. побут. відходів)
17	Перекидання пожежі на прилеглу територію (залізницю і полігон тв. побут. відходів)
18	Влучення снаряду в породний відвал
19	Перекидання пожежі на територію міста

Для математичного моделювання розвитку ймовірних подій та можливих наслідків від техногенних аварій на об'єктах КІ опишемо її на основі

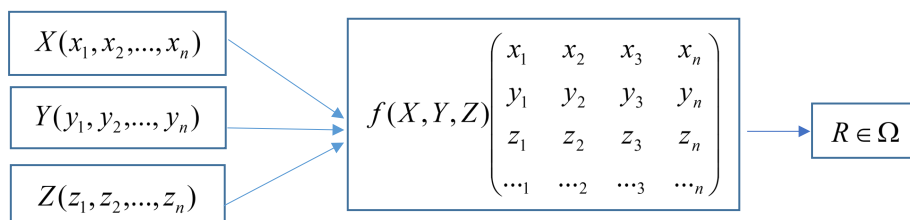


Рис. 1. Структура математичної моделі оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури

сучасної теорії оргграфів. З метою отримання загальної математичної моделі будемо розглядати імовірні варіанти атак на систему КІ у зоні проведення ООС.

На рис. 2 представлена модель кризової ситуації у вигляді орієнтовного графа (орграфа) $G(V, R)$, де V – множина точок які є вершинами або вузлами графа, а R – множина зав'язків проміж вершинами (вузлами) які є ребрами графа.

Характеристики ребер $r_{i,j}$, що пов'язують вершину v_i і вершину v_j , орграфа $G(V, R)$, представляють взаємозв'язок і послідовність розвитку катастрофи.

При дослідженні узагальненої моделі структури гіпотетичного розвитку катастрофи внаслідок атаки на об'єкти критичної інфраструктури особливе значення має виділення елементів структури, які відповідають ізольованим, висячим і тупиковим вершинам.

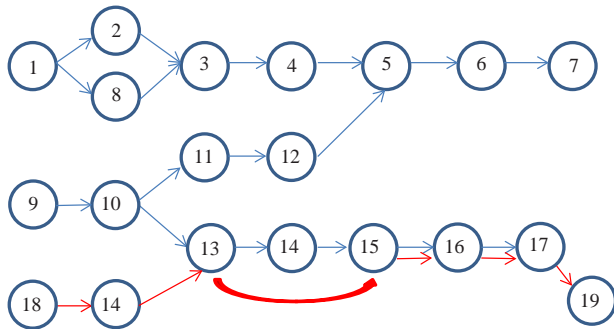


Рис. 2. Узагальнена модель структури гіпотетичного розвитку сценарію техногенної аварії внаслідок ураження потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури Авдіївського коксо-хімічного заводу.

Ізольовані вершини не взаємопов'язані, і між ними відсутня будь-яка взаємодія. У представленій моделі ці вершини відсутні, що означає структурну взаємопов'язаність всіх її елементів.

У висячі вершини неможливо потрапити ні з якої іншої вершини графа. У наведеному графі їх три, що означає три можливі початки розвитку кризової ситуації та демонструє складність системи та взаємопов'язаність її елементів.

Із тупикових вершин графа неможливо потрапити в інші вершини. У наведеному графі – це кінцеві об'єкти розвитку катастрофи.

Для виявлення ізольованих, тупикових і висячих вершин необхідно побудувати матрицю суміжності A , яка відобразить наявність взаємозв'язків між вершинами графа $G(V, R)$. Елементами матриці суміжності A є значення a_{ij} , що характеризують наявність і напрямки ребер між вершинами, котрі визначаються таким чином:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

де 1 – якщо з вершини i можливо перейти до вершини j , 0 – в іншому випадку.

Для кожної вершини $k=1,2,3,\dots,n$ орграфа $G(V, R)$ необхідно знайти вектор (v_k, v_k) з компонентами

$$v_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} \quad (2)$$

$$v^k = \sum_{j=1}^n a_{jk} \quad (3)$$

де v_k – число ребер, що виходять з k -ї вершини v^k , v^k – число ребер, що входять до k -ї вершини.

Якщо $v_k = v^k = 0$ вершина k ізольована $v_k = 0$ вершина k тупикова, $v^k = 0$ – вершина k висяча.

Діаметр структури графа d – це довжина найкоротшого шляху між найбільш віддаленими вершинами графа, що дорівнює кількості ребер, що складають цей шлях:

$$d = \max d_{ij} \quad (4)$$

де d_{ij} – довжина шляху між вершинами v_i і v_j .

Діаметр структури d характеризує максимальний сценарій розвитку катастроф внаслідок ланцюгової реакції при виведенні з ладу об'єктів критичної інфраструктури. За його значенням можливо орієнтовно визначити найгірші сценарії розвитку ситуації, найбільш критичні об'єкти та їх взаємозв'язок.

Для визначення діаметру структури необхідно побудувати матрицю відстаней D між вершинами орграфа $G(V, R)$ елементами якої є довжина найкоротших шляхів d_{ij} між вершинами v_i і v_j .

Близькість вершин v_i і v_j проміж собою визначається через мінімальну довжину шляху для орієнтовного графу:

$$q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}, (i \neq j) \quad (5)$$

Цей параметр використовується для кількісної оцінки структурної компактності орграфа, також часто використовується відносний показник:

$$q_0 = \frac{q}{q_{\min}} - 1 \quad (6)$$

де $q_{\min} = n(n-1)$.

Структурна компактність показує ступінь близькості елементів один з одним. Значення параметра $q_0 > 0$ характеризує наявність роз'єднаності зі зв'язків між деякими елементами системи (в ідеальному випадку всі елементи пов'язані один з одним $q_0 = 0$, при цьому система має максимальну надійність).

Для характеристики нерівномірності завантаження елементів структури використовується

індекс центральності γ , який визначається таким чином:

$$\gamma = \frac{1}{(n-1)(v_{\max}-1)} \sum_{i=1}^n (v_{\max} - v(i)), \quad (7)$$

де $v(i)$ - ступінь вершини i ; $v_{\max} = \max v(i)$.

Близькість індексу центральності до одиниці характеризує ступінь централізації управління силами і засобами в залежності від рівня і масштабів кризової ситуації.

Структурна надмірність δ - це параметр, що відображає перевищення загального числа зв'язків над мінімально необхідним числом зв'язків. Вона визначається наступним чином:

$$\delta = \frac{1}{2(n-1)} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) - 1. \quad (8)$$

Ця структурна характеристика використовується для непрямой оцінки економічності і надійності досліджуваних систем. Як відомо (закон надмірності частин системи), приблизно 20% функцій, елементів і зв'язків системи виконують близько 80% роботи. При створенні працездатної системи потрібно враховувати, що для виконання будь-якої роботи крім основних елементів і зв'язків (виконують головну функцію), необхідно ще приблизно 80% допоміжних, причому вони зазвичай виконують лише 20% основної роботи.

Для систем із максимальною надмірністю структура представляється сільносвязний графом ($\delta > 0$), для систем із мінімальною надмірністю $\delta = 0$, для систем незв'язних $\delta < 0$. Таким чином, система із більшою надмірністю δ потенційно більш надійна, проте в ряді завдань структурної надійності її доцільно доповнити іншим параметром, який враховував би нерівномірність розподілу зв'язків, тобто відхилення заданого розподілу ступенів вершини від рівномірного розподілу.

Для визначення нерівномірності розподілу зв'язків в структурі графа можна використовувати квадратичне відхилення наявного розподілу ступенів вершин від рівномірного:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (v(i) - m_c)^2 = \sum_{i=1}^n v(i)^2 - 4 \frac{m^2}{n}. \quad (9)$$

де m_c - середня ступінь вершини графа.

Показник σ^2 характеризує неповне використання можливостей заданої структури в досягненні максимальної зв'язності та свідчить про відмінність у рівнях завантаженості елементів системи.

Якщо нормувати показник σ^2 щодо його можливого максимального значення σ_{\max}^2 (досягається в системі, що має максимально можливе число вершин, що мають одну зв'язок), то вийде зручний

відносний показник σ_0^2 : чим його значення менше, тим рівномірніше завантаженість елементів.

Для орграфа, що характеризує узагальнену модель структури гіпотетичного розвитку катастрофи внаслідок атаки на об'єкти критичної інфраструктури, максимальне значення σ^2 досягається в разі, якщо всі вершини, відповідні її об'єктам, пов'язані між собою не напряму, а через єдину, тоді

$$m = 2n + f - 4, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n v(i)^2 = 4n^2 + f^2 - 12n + 5f + 8 \quad (11)$$

де f -число вершин, що означають основні об'єкти критичної інфраструктури які викликають ланцюгову реакції катастроф у разі їх руйнування.

$$\sigma_{\max}^2 = 4n^2 + f^2 - 28n - 11f - 4 \frac{(f-4)^2}{n} \quad (12)$$

Отже, в результаті проведення топологічного експрес-аналізу можна визначити кількісні значення характеристик моделі (коефіцієнта структурної надлишковості, нерівномірності розподілу по зв'язках, структурної компактності, діаметра структури та ступеня централізації), дають можливість якісного визначення ступеня стійкості структури гіпотетичного розвитку катастрофи внаслідок атаки на об'єкти критичної інфраструктури.

Матриця суміжності A представлена у табл. 1, в останньому рядку представлені значення сум елементів матриці суміжності A по кожному стовпцю (значення v^k), а в останньому стовпці - значення сум елементів матриці по кожному рядку (значення v_k).

Число ребер орграфа $m = 23$, а число вершин $n = 19$.

Структурна надмірність визначається за формулою (8): $\delta = 0,5$.

Для визначення діаметра структури необхідно побудувати матрицю відстаней D (табл. 2): $d = 7$.

За формулами (5) і (6) обчислюємо для орграфа $K(V, R)$ показники структурної компактності: $q = 235$, $q_0 = -0,32$.

Для розрахунку індексу центральності γ спочатку по матриці суміжності A визначимо значення ступенів вершин орграфу $K(V, R)$: $v(1)=2$, $v(2)=2$, $v(3)=3$; $v(4)=2$, $v(5)=3$, $v(6)=2$, $v(7)=1$, $v(8)=2$, $v(9)=1$, $v(10)=3$, $v(11)=2$, $v(12)=2$, $v(13)=4$, $v(14)=2$, $v(15)=4$, $v(16)=4$, $v(17)=3$, $v(18)=1$, $v(19)=1$, відповідно $v_{\max}=4$; так за формулою (7) визначимо $\gamma=0,6$.

За формулами (9) і (12) визначимо характеристики нерівномірності розподілу по зв'язкам орграфа $\sigma^2=41,68$, $\sigma_0^2=0,97$.

Таблиця 2

Матриця суміжності A орграфа $K(V, R)$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3	2	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	3	2	1	0	0	0	3	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	5	4	3	2	1	0	0	4	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	6	5	4	3	2	1	0	5	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	3	2	1	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	4	3	2	1	0	0	0	2	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	5	4	3	2	1	0	0	3	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	6	5	4	3	2	1	0	4	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	7	6	7	6	5	4	3	0	1	5	0

Таблиця 3

Матриця відстаней D орграфа $K(V, R)$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	v_k	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
v^k	2	1	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	0		

Висновки. За результатами топологічного експрес-аналізу узагальненої моделі структури гіпотетичного розвитку катастрофи внаслідок атаки на об'єкти критичної інфраструктури можливо зробити такі висновки:

коефіцієнт структурної надлишковості $\delta = 0,5$, система з мінімальною структурною надлишковістю. Показує не велику надійність. Таким чином розвиток ланцюгової реакції за наявних параметрів мінімальний. Система захисту об'єктів критичної інфраструк-

тури організована і реалізована правильно і забезпечує загалом безпеку і стабільну роботу об'єктів КІ;

відносна нерівномірність розподілу по зв'язкам $\sigma^2_0=0.97$ показує нерівномірну завантаженість вузлів (в наявності критичні об'єкти які можуть бути під впливом декількох загроз);

відносна структурна компактність $q_0=-0,32<0$ характеризує розрізненість по зв'язкам між елементами структури, що є цілком логічним за своїм функціональним напрямком;

діаметр структури $d=7$ відповідає максимальному розвитку ланцюгової реакції катастроф узагальненої моделі структури гіпотетичного розвитку катастрофи внаслідок атаки на об'єкти КІ;

ступень централізації $\gamma=0.6$ свідчить про достатній характер централізації (основного напрямку) розвитку катастроф в наслідок атаки на об'єкти КІ і адекватності побудованої моделі.

Таким чином була розроблена математична модель оцінювання загроз і ризиків для об'єктів КІ за допомогою теорії графів. Було побудовано та зроблено експрес-аналіз узагальненої моделі структури сценаріїв гіпотетичного розвитку техногенної аварії внаслідок атаки на об'єкти КІ, в результаті якого оцінено стійкість системи критичних об'єктів до впливу дестабілізуючих (руйнуючих) факторів і впливів. Результати експрес-аналізу показали достовірність та адекватність запропонованої методики.

Модель оцінювання загроз і ризиків для об'єктів КІ доцільно застосовувати при визначенні й оцінці ризиків і загроз об'єктам КІ, вона дозволяє враховувати усі необхідні фактори, досліджувати складні системи КІ і визначати напрямки щодо прогалин спроможностей за захисту об'єктів і ліквідації наслідків у разі катастроф.

Список літератури:

1. Лисенко О.І., Чеканова І.В., Кутовий О.П., Нікітін В.А.. Стратегії управління ризиками на об'єктах критичної інфраструктури в умовах невизначеності. URL: <http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/infrastrukt-86de2.pdf>.
2. Чумаченко С.М., Троцько В.В. Оцінювання загроз об'єктам критичної інфраструктури. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. Вип. 1 (3). С. 41–47.
3. Бобро Д.Г. Методологія оцінки рівня в критичній інфраструктурі. *Стратегічні пріоритети. Серія «Економіка»*. 2015. № 4 (37). С. 83–93.
4. Pederson P., Dudenhoefter D., Hartley S., Permann M. Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research. Idaho Falls, Idaho: Idaho National Laboratory, 08.2006, 126 p.
6. Yakovliev Y., Chumachenko S. Ecological Threats in Donbas, Ukraine. Centre for Humanitarian Dialogue. Geneva, 2017. 60 p.
7. Environmental Assessment and Recovery Priorities for Eastern Ukraine / Denisov N., Averin D, Yushchuk A., Yermakov V., Ulytskyi O., Bystrov P., Zibtsev S., Chumachenko S, Nabyvanets Y. Kyiv : VAITE, 2017. 88 p.
8. On the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection: Council Directive 2008/114/EC. URL: <http://eur-lex.europa.eu>.
9. 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»*. Вип. 1. 2015. С. 206–2018.
10. 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. *Інженерія природокористування*. 2020. № 4 (18). С. 114–123.
11. Фурсенко О.М., Чумаченко С.М., Кармазін С.В. Експертна оцінка загроз для об'єктів критичної інфраструктури газотранспортної системи України з використанням методу аналізу ієрархій. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Вип. 9. 2015. С. 68–77.

Murasov R.K., Chumachenko S.M., Pirikov O.V., Guida O.G., Kiva I.L. PECULIARITIES OF CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODEL OF THREAT ASSESSMENT FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS USING GRAPH THEORY

The paper investigates the problem of building a mathematical model for assessing threats and risks to critical infrastructure. The urgency of the problem of threat assessment is primarily due to the difficult situation in eastern Ukraine, where a significant number of them are in the area affected by the hybrid armed conflict. As a result, the critical infrastructure protection system is unable to fully perform its tasks, which could further lead to significant human casualties and non-combat casualties among the military.

Using classical graph theory, an approach to building a mathematical model for threat assessment for critical infrastructure has been proposed. This model allows you to calculate possible options for the

development of man-made accidents and predict options for the development of events. A rapid analysis of the generalized model of hypothetical scenarios of hypothetical emergencies (HE) due to the destruction of critical infrastructure (CI) was built and performed, as a result of which the resilience of facilities to destabilizing factors and hazards was assessed.

The results of rapid analysis showed the reliability and adequacy of the proposed method.

The model of threat and risk assessment for critical infrastructure objects should be used in identifying and assessing risks and threats to potentially dangerous CI objects. It allows to take into account all the necessary factors, to study the complex systems of critical infrastructure and to identify areas for capacity gaps for the system of protection of CI facilities and emergency response in case of man-made accidents and disasters.

The article presents a topological rapid analysis of the generalized model of the scenario of emergency development due to the destruction of critical infrastructure in eastern Ukraine, which showed sufficient ability of critical infrastructure to resist external destructive influences and its vulnerability to hybrid warfare and terrorist acts.

Key words: *complex system model, system stability, graph theory, critical infrastructure, combinatorial analysis, threat assessment, system structure topology.*