DOI: 10.35681/1560-9189.2025.27.1.335624

УДК 004.5

В. Р. Сенченко[1], А. В. Бойченко[1],
О. В. Коваль[1,2], О. М. Хоменко[2]
[1]Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна
[2]НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»
Проспект Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна

Методологія і архітектура платформи моделювання взаємозалежностей у критичних інфраструктурах при виникненні каскадних ефектів

Моделювання та симуляція за допомогою програмних засобів дозволяють більш точно оцінити вразливості критичної інфраструктури (КІ), що дає змогу зрозуміти потенційні збої і виробити рішення щодо покращення наслідків каскадних ефектів. Проте ефективний аналіз КІ має враховувати складні, багатовимірні характеристики інфраструктури та залежності між її об'єктами. У статті представлено методологію моделювання та симуляції взаємозалежностей критичної інфраструктури під впливом каскадних ефектів. На базі методології запропоновано загальну архітектуру інтегрованої платформи, яка залучає розробки існуючих інструментів open sources та frameworks для моделювання та симуляції каскадних ефектів. Робота виконується в рамках проєкту «SACE-24». Завдяки інтеграції перевірених інструментів моделювання, комплексного керування даними таке рішення може значно покращити здатність аналізувати та пом'якшувати наслідки каскадних збоїв у КІ.

Ключові слова: *критична інфраструктура, каскадний ефект, інструментальні засоби, моделювання, симуляція, програмне забезпечення, платформа.*

Вступ

Останнім часом дослідження різних аспектів критичних інфраструктур під впливом каскадних ефектів значно розвинулися [2, 10, 12]. КІ складаються з різноманітних компонентів (об'єктів), які можуть включати важливі послуги, інформаційні системи, комунікаційні мережі, що необхідні для функціонування суспільства. Проте об'єкти КІ вразливі до різноманітних збоїв, починаючи від легких (коротко-

часне відключення електроенергії) до серйозних — стихійне лихо, руйнування обладнання, масштабні пожежі, терористичні та військові дії. В умовах повномасштабної війни об'єкти КІ стали однією із ключових сфер, які зазнали найбільших атак з боку РФ в Україні. За даними Київської школи економіки (KSE) станом на 30.09.24 року загальний обсяг непрямих фінансових втрат лише в транспортному секторі складає $38,8 млрд. [4].

Як правило, об'єкти КІ мають складні взаємозв'язки та взаємозалежності. Згідно з визначенням взаємозалежність — це двонаправлений зв'язок між об'єктами інфраструктури, через який на стан кожного об'єкта інфраструктури впливає стан іншого об'єкта або іншої КІ [3, 6]. Взаємозв'язок між об'єктами КІ є передумовою каскадних ефектів (КЕ), які виникають, коли порушення об'єкта інфраструктури поширюється за межі КІ, спричиняючи відчутний вплив на об'єкти іншої інфраструктури, що, в свою чергу, впливає і на стан інших об'єктів інфраструктури. Наслідки каскадних ефектів через збій інфраструктури можуть варіюватися від легких до катастрофічних. Таких прикладів дуже багато.

Не дивно, що в міру ускладнення інфраструктур зростає потреба в аналізі та кращому розумінні взаємозалежностей між об'єктами структур. Тому моделювання, аналіз взаємозалежностей між об'єктами КІ та прогнозування їхніх наслідків є дуже важливою стороною дослідження КЕ, оскільки неможливо безпосередньо перевірити вплив процедур контрольованого відключення для сегментів електромережі [11] або поширення комп'ютерного вірусу на платіжну систему [6].

Для дослідження поведінки об'єктів КІ в різних галузях розроблено та продовжують розроблюватися методи та інструментальні засоби моделювання, які залежно від мети моделювання охоплюють різні аспекти поведінки інфраструктури: оцінки ризику КІ, резильєнтності інфраструктур, вразливості тощо. Слід відмітити декілька платформ і стандартів для реалізації спільного моделювання, таких як інтерфейс функціонального макету (functional mock-up interface — FMI) [14], архітектура високого рівня (high-level architecture — HLA) [7] і розподілене інтерактивне моделювання (distributed interactive simulation — DIS) [12]. Останніми роками стандарт HLA все частіше використовується для розробки взаємозалежних інфраструктурних моделей для виконання моделювання в розподіленому середовищі.

Постановка завдання

Незважаючи на існування різноманітних інструментів і фреймворків для моделювання та дослідження КІ, залишається значна прогалина в інтегрованих платформах моделювання каскадних ефектів, які без залучення дорогих спеціалізованих програмних засобів дозволяють проводити моделювання взаємозалежних КІ. Для усунення зайвих фінансових витрат автори статі пропонують до розгляду інтегровану платформу, яка залучає розробки існуючих інструментів open sources та frameworks для моделювання та симуляції каскадних ефектів. Робота виконується в рамках проекту «SACE-24». В статті запропоновано методологію моделювання та архітектуру платформи для інтеграції інструментальних засобів open sources при дослідженні каскадних ефектів і прогнозування їхніх наслідків.

Моделювання та симуляція

Загальна мета моделювання полягає в тому, щоби визначити загрози та залежності, що призводять до каскадних ефектів у взаємопов'язаних КІ. При розгляді питань практичної реалізації інструментальних засобів комп'ютерного моделювання розробник цих засобів вимушений розрізняти процеси на моделювання та симуляцію (modeling and simulation — M&S) [2]. Обидва процеси є важливими для досліджень каскадних події, але вони виконують різні ролі в контексті аналізу та розуміння взаємодії КІ та оцінки наслідків КЕ.

Моделювання — це процес створення абстрактного уявлення системи, об'єкта чи явища, метою якого є намагання зрозуміти і описати, як критична інфраструктура функціонує або поводиться за певних умов. Залежно від особливостей предметної області, моделі КЕ можуть бути математичними, концептуальними або просторовими як ГІС-моделі.

Симуляція — це процес використання моделей для проведення експериментів і аналізу поведінки КІ у часі та просторі. Симуляція передбачає запуск моделі за різними сценаріями для спостереження за результатами та прогнозування майбутньої поведінки КІ.

По суті, моделювання полягає в створенні уявлення про взаємодію КІ під впливом КЕ, а симуляція — у використанні цього уявлення для дослідження та прогнозування результатів розвитку КЕ — напрацювання різних сценаріїв розвитку каскадних подій. Хоча обидва процеси є різними, вони взаємозалежні, тобто симуляція покладається на моделі КЕ для розробки стратегії пом'якшення наслідків КЕ за рахунок аналізу різних сценаріїв розвитку.

Методологія інтегрованого моделювання та симуляції (M&S-підходу) базується, зокрема, на здатності інтегрувати моделі окремих об'єктів КІ в єдину комплексну модель каскадного процесу. Відповідно до методології кожний процес над окремим об'єктом КІ може бути функціонально пов'язаний зі станом інших об'єктів інфраструктури з урахуванням причино-наслідкових зв'язків. Моделювання КЕ стає особливо ефективним завдяки широкому застосуванню сучасних інструментальних засобів, таких як мережеве проектування, агентно-орієнтоване моделювання геоінформаційної системи або аналіз великих даних.

У контексті практичного застосування M&S-підходу, пропонується поділяти методологію інтегрованого моделювання на два процеси:

— розробку базової моделі взаємодії КІ при виникненні КЕ;

— дослідження сценаріїв розвитку КЕ на підставі отриманої моделі.

Розробка базової моделі процесів — modeling

Крок 1. Визначення особливостей КІ та цілей моделювання

Розробка базової моделі взаємодії КІ починається з:

— визначення особливостей критичної інфраструктури, яку потрібно моделювати (наприклад, електромережа, водопостачання, транспорт, телекомунікації);

— визначення потенційних загроз для кожної інфраструктури (техногенні аварії, стихійні лиха, людські помилки, кібератаки або терористичні дії);

— установлення цілей моделювання, що мають бути досягнуті за результатами дослідження (розуміння вразливостей, оцінка можливих сценаріїв відмов і

їхній вплив на систему в цілому, прогнозування каскадних збоїв або розробка стратегій пом'якшення);

— визначення особливостей взаємодії між КІ — просторовий і часовий масштаби моделювання або встановлення географічного регіону. Просторове відношення може бути представлено кортежем (об'єкт × розташування).

Крок 2. Збір даних про інфраструктуру, що досліджується

Це передбачає використання широкого спектра інструментальних засобів і процедур, які дозволяють збирати дані з різних джерел, форматів, застосовуючи й онтології. Такі засоби мають забезпечувати:

— збір наявної інформації (включаючи історичні дані) про характер загроз і збоїв, наприклад, тривалість відключення електроенергії, затори на дорогах, перебої з водопостачанням;

— дані про ймовірні прояви та наслідки КЕ, включаючи екологічні та зовнішні чинники небезпеки, кіберзагрози або людські помилки, які можуть викликати каскадні збої.

Крок 3. Визначення залежностей і взаємозалежностей

Визначення і опис причино-наслідкових залежностей між об'єктами КІ через фактори впливу як у самій системі, так і залежності від зовнішніх систем. Прикладами таких залежностей можуть бути:

— електростанція, що постачає електроенергію на очисні споруди;

— кіберзалежності зв'язків інформаційно-комунікаційних технологій типу SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) [28];

— географічні зв'язки, які впливають на розповсюдження КЕ, включаючи й особливості місцевості (роза вітрів, русла річок, висоти);

— ризики спільного розміщення або вразливості спільних ресурсів;

— логічні та функціональні зв'язки між інфраструтурами;

— порушення транспортування, що призводить до проблем із ланцюгом постачання тощо.

Крок 4. Розроблення концептуальної моделі

На цьому кроці необхідно ввести конкретні поняття та характеристики (параметри) через список подій, які визначають КЕ. Як показано на рис. 1 [13], кожний стан КІ може описуватися сукупністю параметрів (наприклад, вводяться поняття впливу залежностей (Dependency impact — DI), впливу системи (System impact — SI), тригерна подія (Initiating event — IE), послідовності переходів у КІ (Conse quence — C), умови переходів (Conditions — CD) і характеристики (Characteristics — CH), які сприяють розвитку різних сценаріїв КЕ. Функціональні відношення між об'єктами КІ можуть бути представлені кортежем $\{C, CD, CH\}$, який визначає особливості взаємодії.

Для реалізації цього кроку у вигляді концептуальної моделі КІ можуть використовуватися спеціальні інструментальні засоби і функції для створення та опису моделі.

Перш за все, це засоби для представлення інфраструктури КІ (Consequence — C) як мережі вузлів (компонентів) і з'єднань.

По-друге, процедури визначення правил поширення відмов (Conditions — CD) на основі динаміки розповсюдження КЕ, робочих порогів (параметрів) і залежностей.

По-третє, процедури визначення та опису характеристик (Characteristics — CH) (параметрів) вузлів, (наприклад, підстанції або резервуари) та ребер — зв'язків, (лінії електропередачі або трубопроводи).

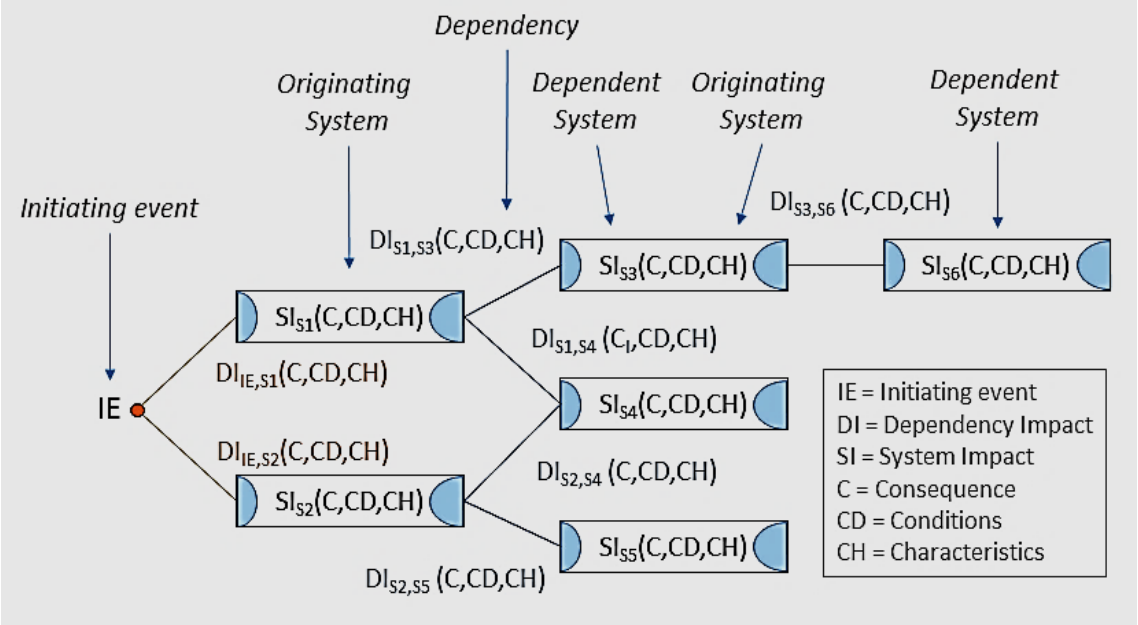

Рис. 1. Приклад концептуальній моделі КЕ за даними [13]

Крок 5. Вибір методів моделювання, які відповідають цілям і наявним даним

Вибір відповідних методів для моделювання каскадних ефектів у критичній інфраструктурі залежить від складності системи, доступності даних і аналітичних цілей. Для більшості критично важливих інфраструктурних додатків гібридні підходи, що поєднують теорію мереж, моделювання на основі агентів і системну динаміку, пропонують найповніше розуміння:

— моделі теорії мереж для вивчення взаємозалежностей і розповсюдження КЕ за допомогою методів на основі графів;

— моделі на основі агентів (АВМ) для моделювання поведінки та взаємодії окремих компонентів;

— моделі системної динаміки для аналізу взаємодій високого рівня та циклів зворотного зв'язку між системами;

— гібридні підходи, які поєднують кілька методів для більш комплексного моделювання.

Ці п'ять кроків не обов'язково виконуються послідовно. Кожен крок залишається безперервним у міру того, як змінюються питання аналізу КІ (завдяки збору даних, верифікації і перевірці). Крім того, процес розробки базової моделі взаємодії КІ при виникненні КЕ інтегрований з вибором методів моделювання, які можуть суттєво змінювати її представлення.

Дослідження сценаріїв розвитку — simulation

Крок 6. Симуляція моделі для опрацювання різних сценаріїв розвитку КЕ

На цьому кроці використовується модель взаємодії КІ, що отримана за результатами попереднього процесу моделювання. Налаштування процесу симуляції моделі включає такі процедури:

— уведення початкових даних для імітації тригерних подій (Initiating event — IE). Залежно від сфери застосування це можуть бути: стихійні лиха, технічні збої, помилки персоналу, кібератаки тощо);

— вибір параметрів відповідних прецедентів на підставі експертних оцінок або з бази накопиченого досвіду;

— використання алгоритмів поширення збоїв між системами на основі взаємозалежностей і правил каскадного впливу;

— додання випадковості для врахування невизначеностей і мінливостей при розвитку КЕ.

Крок 7. Аналіз результатів симуляції моделі

Аналіз результатів моделювання каскадних ефектів вимагає поєднання точності моделі та практичної інтерпретації. У процесі аналізу моделі КЕ на реальних даних виявляються критичні вразливості, порівнюються результати з експертними знаннями. Основними завданнями цього кроку є:

— кількісна оцінка впливу та тривалості збоїв у моделі взаємодії між інфраструктурами;

— аналіз поведінки найбільш уразливих об’єктів КІ, що сприяють розвитку каскадних збоїв (критичні вузли та зв’язки) на підставі симуляції моделі;

— оцінка стійкості — здатність КІ до виконання основних функцій і відновлення після збоїв;

— візуалізація результатів у вигляді графіків, діаграм або карт для оцінки результатів моделювання.

Крок 8. Валідація та вдосконалення моделі (перевірка на реалістичність)

Для забезпечення реалістичності і актуальності моделювання каскадних ефектів необхідна сувора перевірка для розуміння та пом’якшення ризиків, які пов’язані із взаємозалежними КІ. Послідовність дій, які використовуються для аналізу каскадних збоїв у взаємопов’язаних системах, включає в себе:

— проведення аналізу чутливості моделі для визначення того, як різні вхідні дані моделі впливають на розвиток сценаріїв КЕ, тобто доцільно дотримуватися семантичної сумісності, що дозволяє інтегрувати різноманітні джерела даних для валідації моделі КЕ;

— визначення критичних параметрів та оцінка їхнього впливу на вибір сценаріїв розвитку КЕ;

— порівняння результатів симуляції на моделі з історичними подіями або емпіричними даними, щоби забезпечити точність моделювання;

— удосконалення моделі та методології симуляції на основі нових даних, що отримані в процесі симуляції (перехід на пункт 4);

— удосконалення дизайну системи моделювання та симуляції з огляду на мінімізацію частоти збоїв, поширення збоїв і наступних небезпек.

Крок 9. Розроблення стратегії пом'якшення наслідків каскадних ефектів

Розробка каскадної стратегії пом'якшення є важливою для управління ризиками в складних системах. Ця стратегія особливо актуальна в таких секторах як енергетика, транспорт, фінанси, IT і критична інфраструктура. Покроковий посібник зі створення ефективної стратегії пом'якшення каскаду такий:

— формування заходів для пом'якшення наслідків КЕ, ізоляція критичних вузлів або створення резервування;

— тестування і оцінка ефективності запропонованих стратегій за різних сценаріїв розвитку КЕ.

Крок 10. Документування та супроводження моделі

Повна документація та профілактичне обслуговування гарантують, що моделі КЕ залишаються точними, актуальними та дієвими. Інтегруючи контроль версій, відгуки зацікавлених сторін і постійну перевірку, розробник може підтримувати ці моделі як життєво важливі інструменти для планування стійкості КІ. Цей крок включає:

— опис концептуальної моделі, який містить детальний опис мети досліджень, обсягу та припущень моделі;

— опис джерел даних, включаючи формати та будь-які етапи попередньої обробки даних;

— методологічні особливості дослідження КЕ, зокрема алгоритми, рівняння або рамки, що використовуються в моделі;

— опис взаємозалежностей між компонентами інфраструктури, причино-наслідкові зв'язки та залежності між різними компонентами моделі.

Запропонована методологія забезпечує основу для розробки та використання комп'ютерних моделей для аналізу КЕ у взаємопов'язаних КІ. Розуміючи потенційні наслідки порушень та оцінюючи ефективність стратегій пом'якшення, може підвищити стійкість і безпеку КІ. Дозволяє тестувати сценарії «що – якщо» для аналізу різних моделей відмов.

Склад засобів моделювання та симуляції каскадних ефектів взаємопов'язаних критичних інфраструктур

Методологія моделювання та симуляції каскадних ефектів базується, зокрема, на здатності інтегрувати окремі моделі КІ в єдину структуру.

Виходячи із запропонованого підходу, проведено огляд існуючих мов високого рівня та інструментальних програмних засобів моделювання та симуляції КЕ взаємопов'язаних КІ, включаючи й графове представлення моделей, а також визначення їхніх функціональних переваг для різних предметних областей. За результатами аналізу запропоновано створення Платформи моделювання та симуляції каскадних ефектів взаємопов'язаних КІ. Склад Платформи показано на рис. 2.

Веб-портал Cascading Effects Modeling & Simulation of Critical Infrastructures — це інтегрована платформа для дослідження, аналізу, прогнозування та вироблення рішень щодо пом'якшення наслідків КІ. Такий портал дозволить зацікавленим сторонам візуалізувати, моделювати та планувати каскадні збої КІ, в таких сферах як енергетика, транспорт, водопостачання, та комунікаційні системи. Основні характеристики веб-порталу для моделювання КЕ такі:

1) зручний інтерфейс користувача, який має забезпечувати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс сумісний з різними браузерами та пристроями для полегшення навігації порталом, використання ресурсів та інструментальних засобів моделювання;

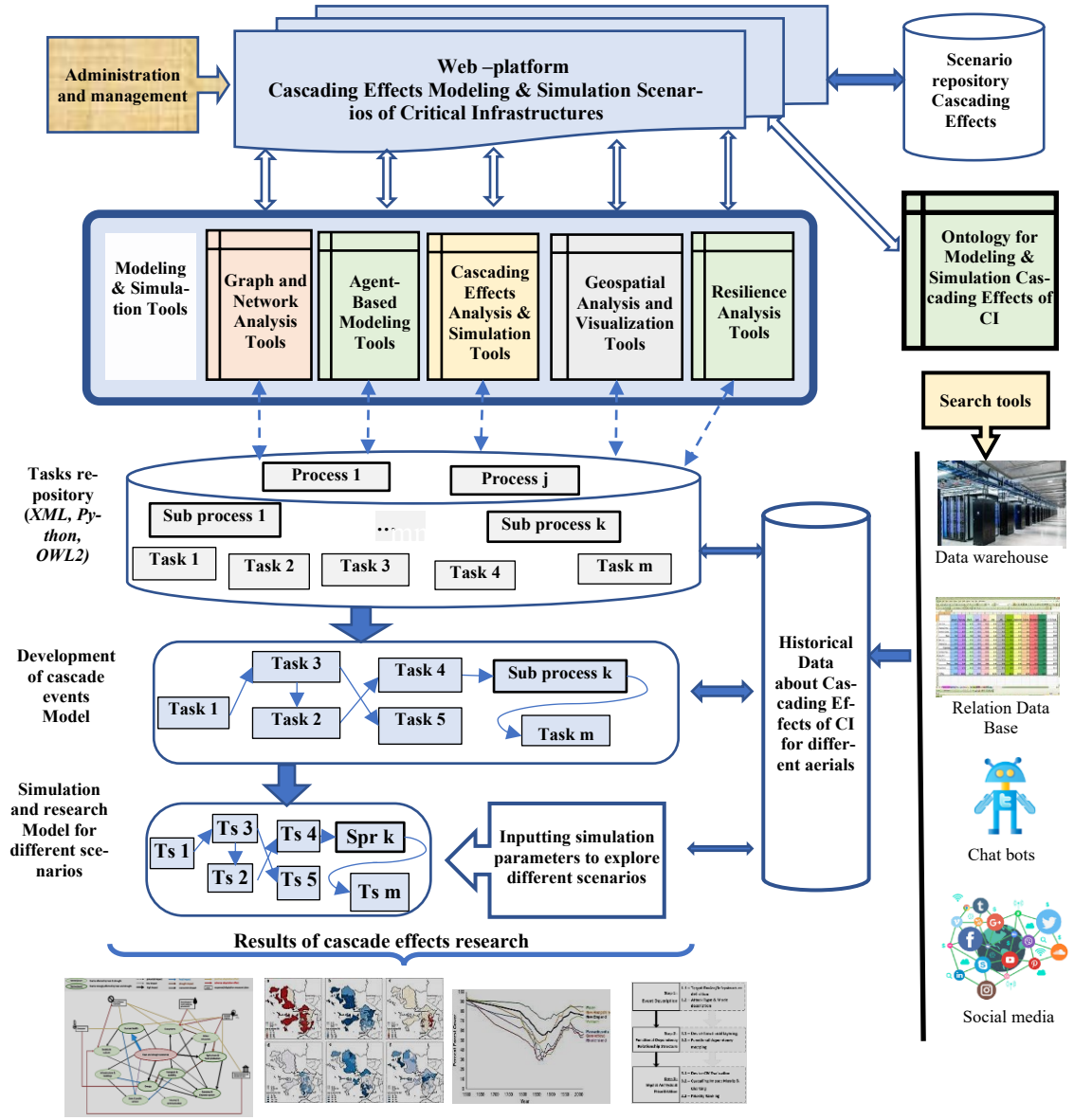

Рис. 2. Платформа моделювання та симуляції каскадних ефектів взаємопов'язаних критичних інфраструктур

2) широкий спектр інструментальних засобів моделювання Modeling & Simulation Tools починаючі від засобів графічного моделювання та закінчуючи засобами оцінки резильєнтності КІ;

3) управління та інтеграція даних, включаючи репозиторій даних, який містить бази історичних інцидентів, картографічні дані інфраструктур і відповіді дані для моделювання;

4) створення або вибір типового (шаблону) сценарію розвитку КЕ та встановлення параметрів для моделювання;

5) безпека та контроль доступу із встановленням паролів для входу в систему та захисту конфіденційних даних;

6) інструменти візуалізації і звітності результатів моделювання та дослідження різних сценаріїв.

Для побудови архітектури веб-порталу більш доцільними вважаються такі платформи як Drupal або Django CMS через їхню модульну структуру та можливості гнучкого налаштування додаткових параметрів.

Drupal [29] — модульна система керування вмістом (CMS) з відкритим вихідним кодом, написана мовою програмування PHP, яка розповсюджується за ліцензією GNU. Drupal надає базову структуру з відкритим вихідним кодом принаймні для 14 % із 10 000 найкращих веб-сайтів у всьому світі. У дистрибутив системи входить набір модулів, що дають можливості призначення профілю користувача пошуку за змістом; таксономія (впорядковування матеріалу за категоріями); формування сторінок з матеріалами в різних формах і багато інших.

Django CMS [15] — система керування вмістом (content management system — CMS) з відкритим кодом, створена за допомогою веб-платформи Django, придатна для складних корпоративних порталів. Основними перевагами Django CMS є:

1) зручний інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для редагування вмісту та пошуку даних, що дозволяє створювати вміст порталу та керувати ним без необхідності занурення в технічні аспекти процедур;

2) широкий спектр напрацьованих і перевірених плагінів, що дозволяє змінювати або розширювати функціональність порталу без зайвих витрат часу та інтелектуальних зусиль;

3) потужні функції безпеки на основі Django, які гарантують, що портал буде захищеним від типових загроз безпеці.

Scenario repository Cascading Effects — це структурована колекція потенційних сценаріїв. Створення репозиторію сценаріїв передбачає систематичну каталогізацію реальних і гіпотетичних сценаріїв каскадних збоїв у КІ. Цей репозиторій служить базою знань для оцінки ризиків, навчання та планування стійкості й розробки стратегії пом’якшення. Кожен сценарій у репозиторії має описуватися кортежом:

{Назва*тригерна_подія*шлях_розповсюдження*постраждалі_системи*потенційні_наслідки*заходи_пом'якшення*отримані_уроки}.

Ядром порталу є <**Modeling & Simulation Tools>**. Ядро об’єднує різні інструменти та ресурси для моделювання, аналізу та пом’якшення каскадних збоїв. Виходячи з позиції функціональності, та найбільш доцільними є наступні інструментальні засоби.

1. **Graph and Network Analysis Tools**. Більшість КІ за своєю суттю є взаємопов’язаними. Це означає, що збої в одній частині КІ можуть поширюватися на мережу, спричиняючи каскадні ефекти. Для дослідження каскадних ефектів у КІ доцільно використовувати такі інструментальні засоби з відкритим кодом:

1) **Python (with Libraries like NetworkX and SimPy)** [16] — інструментальний засіб на основі **Python** для створення та дослідження взаємодії між об’єктами

КІ під впливом каскадних події. У свою чергу засіб складається з двох груп спеціалізованих програмних пакетів, а саме:

— NetworkX пакет Python [16], що орієнтований на створення графової структури складних мереж, дослідження її динаміки та функцій. NetworkX включає процедури опису структури даних для побудови графів, багато стандартних алгоритмів аналізу вузлів графів і мереж. Вузли можуть бути представлені різними типами даних, такими як текст, зображення, записи XML, та містити описи ребер з вагами, або довільні дані у вигляді часових рядів;

— SimPy (Simulation in Python) [17, 18] пропонує підхід, що базується на процесному моделюванні подій. Процеси в Simpy визначаються функціями генератора Python і можуть використовуватися для моделювання активних компонентів, таких як клієнти, транспортні засоби чи агенти. SimPy використовує різні типи спільних ресурсів, що дозволяє описувати дані об'єктів взаємозв'язаних КІ з різних точок зору (наприклад, сервери, лічильники оформлення замовлення та тунелі).

2) **igraph (R/Python/C++)** [14] — бібліотека з вільним доступом для аналізу мережевих структур з акцентом на продуктивність, яка пропонує алгоритми для побудови мережевих моделей, виявлення спільноти та динамічного моделювання мережі:

— Gephi [35] — це програмне забезпечення з відкритим кодом для візуалізації та дослідження взаємозалежностей між КІ. Може використовуватися для візуалізації поширення каскадних збоїв у моделі взаємодіючих КІ. Gephi написаний мовою Java на платформі NetBeans.

2. **Agent-Based Modeling Tools** може містити такі засоби як:

1) Repast Simphony (Java) [34] — набір інструментів для агентного моделювання та імітації взаємодії КІ на основі моделей із взаємодіючими агентами, що представляють різні компоненти критичної інфраструктури;

2) NetLogo [19, 20] — інтегроване середовище розробки (IDE) та мова програмування для моделювання на основі агентів. NetLogo орієнтовано на моделювання складних систем, що розвиваються з часом. Це дає змогу досліджувати зв'язок між поведінкою агентів на мікрорівні та моделями макрорівня, які виникають у результаті взаємодії КІ під впливом каскадних ефектів.

3. **Cascading Effects Analysis and Simulation Tools** включає:

1) OpenModelica [23, 32] — безкоштовне середовище з відкритим вихідним кодом, яке засноване на мові моделювання Modelica для симуляції, оптимізації і аналізу складних динамічних систем;

2) AnyLogic Personal Learning Edition (PLE) [31] — безкоштовна версія програмного забезпечення, яке відоме своєю гнучкістю та здатністю працювати з гібридними моделями, поєднуючи різні підходи до моделювання для більш точного моделювання систем реального світу. Ця можливість робить його особливо корисним для аналізу каскадних ефектів у критичній інфраструктурі та інших складних системах.

4. **Open source of Geospatial Analysis and Visualization Tools**

1) QGIS (Quantum GIS) [21] — інструмент геоінформаційної системи (ГІС) з відкритим кодом для аналізу та візуалізації просторових даних. QGIS має зручний інтерфейс і потужну підтримку спільноти, що робить його доцільним для просторового моделювання каскадних ефектів, які поширюються на великих територіях;

2) PostGIS [36] — це розширення для PostgreSQL, яке додає підтримку для географічних об'єктів при виконанні розширених просторових запитів;

3) OpenStreetMap (OSM) [22] — безкоштовна відкрита база даних карт світу, яка оновлюється та підтримується спільнотою волонтерів через відкриту співпрацю. OpenStreetMap являє собою веб-сайт, який підтримує систему зберігання та пошуку карт. Для цього використовується топологія карт, що дозволяє експортувати карти, які потрібні для просторового моделювання каскадних ефектів, у формати QGIS.

Інструменти Geospatial Analysis and Visualization доцільно використовувати для моделювання фізичного розташування об'єктів і взаємозалежностей КІ при просторовому моделюванні, а також виявленні вразливих вузлів каскадних ефектів, особливо транспортної і комунальної інфраструктури в міському ландшафті.

5. **Resilience Analysis Tools**. Аналіз стійкості для дослідження ефектів каскаду в критично важливих інфраструктурах передбачає оцінку того, як ці інфраструктури можуть протистояти збоям і відновлюватися після них. Сьогодні найбільш поширеними є такі платформами з відкритим вихідним кодом:

1) RAIL (Resilience Assessment and Improvement Tool) — платформа для аналізу стійкості систем критичної інфраструктури, яка допомагає оцінити та підвищити стійкість інфраструктур до різних збоїв, таких як стихійні лиха, кібератаки тощо;

2) GRRASP (Geospatial Risk and Resilience Assessment Platform) — веб-орієнтована архітектура, розроблена European Commission's Joint Research Centre [26, 27]. GRRASP побудований на технологіях з відкритим кодом, що робить його доступним і настроюваним на задачі дослідника. Як стверджує розробник, GRRASP може бути розгорнута на окремих серверах як засіб для полегшення аналізу ризиків і стійкості критичної інфраструктури. Платформа дозволяє об'єднувати геопросторові технології і обчислювальні інструменти для аналізу та моделювання критичної інфраструктури. Основними особливостями архітектурного рішення GRRASP є:

1) багаторівневий підхід до аналізу та дослідженню поведінки критичної інфраструктури, який пропонує виконувати різні види аналізу: на галузевому рівні КІ; із зосередженням на взаємозалежностях між КІ; високорівневому аналізі, включаючи й економічні наслідки впливу порушень CINOPSYS на функціонування взаємопов'язаних інфраструктур;

2) підтримка різних видів обміну геопросторовими даними при моделюванні взаємодії інфраструктур, що дозволяє проводити спільний аналіз і об'єднане моделювання. Для цього платформа застосовує веб-сервіси, такі як Drupal [29], GeoServer, математичні моделі для критичних інфраструктур та інструменти візуалізації, такі як OpenLayers і D3.js (Data-Driven Documents);

3) бібліотека OpenLayers [28] на онові JavaScript з відкритим вихідним кодом для відображення картографічних даних у веб-браузері у вигляді карт. OpenLayers надає API для створення веб-географічних програм, подібних до Google Maps і Bing Maps;

4) бібліотека D3.js (Data-Driven Documents) [37] на онові JavaScript для створення динамічної та інтерактивної візуалізації даних у браузерах, яка використовує стандарти масштабованої векторної графіки (SVG), HTML5 і Каскадних Таблиць Стилів (CSS).

Створення реалістичних моделей розвитку та симуляції каскадних ефектів вимагає завдання коректних показників об'єктів КІ. Як показує досвід, залежно від конкретних значень параметрів показників можуть виникати різні сценарії розвитку каскадів. Для підвищення рівня реалістичності моделювання при завданні критичних показників доцільно спиратися на історичні дані (накопичений досвід). Саме тому до складу порталу включений Редактор і фреймворк для створення таксономії і онтології предметної області — Protégé 5. [33]. Онтологія, як формальне представлення знань у термінах об'єктів, атрибутів і відносин. Онтологія допомагає знаходити прецеденти, які мали місце в минулому, що дозволяє визначити та більш точно описати взаємозв'язки, залежності та поведінку в КІ, зменшуючи ймовірність пропуску критичних факторів.

Наприклад, використовуючи широкий спектр вихідних дані, які описують реальні об'єкти, зокрема криві навантаження та рівняння потоку потужності для електромереж, можна отримувати різні сценарії розвитку події, спираючись на прецеденти.

Отже, онтологія аналізу сценаріїв розвитку КЕ складається з трьох частин, це:

1) онтологія, яка описує компоненти інфраструктури та зв'язки між ними;

2) онтологія, яка описує вразливості критичної інфраструктури;

3) онтологія можливих тригерних подій, способів використання вразливості та можливі заходи пом'якшення.

Включення онтології до розробки моделей каскадних ефектів значно підвищує їхню точність, забезпечуючи узгодженість, комплексність і адаптивність. Структуруючи знання та сприяючи інтеграції даних, онтології підтримують створення більш реалістичних моделей, які точно відображають складність систем реального світу. Цей структурований підхід має вирішальне значення для покращення процесу прийняття рішень і підвищення резильєнтності КІ.

При дизайні та розробці ПЗ веб-порталу можуть бути використані різні архітектури: монолітна архітектура, мікросервісна архітектура, що впливає на процес розробки, тестування, розгортання, підтримку та логіку роботи застосунку. Більшість ПЗ розробляється із використанням монолітної архітектури: застосунок спроєктований як єдиний блок, функціонал міститься в одній кодовій базі та розгортається як єдине ціле, компоненти застосунку інтегровані разом у цій конструкції. Монолітна архітектура характеризується простотою та легкістю розробки малих і середніх програм, але зміни або оновлення функціоналу застосунку потребують модифікації і повторного розгортання всього моноліту, що ускладнює обслуговування, оскільки розмір і складність програми зростають.

Мікросервісна архітектура — підхід, який використовується для декомпозиції (поділу) складної системи на множину слабко пов'язаних сервісів з відповідною бізнес-логікою (кожен сервіс виконує певну бізнес-логіку), які взаємодіють між собою через API. Сервіси є ізольованими, що полегшує їхню розробку, тестування та розгортання. Крім того, сервіси можуть використовувати різні технологічні стеки, мову програмування, базу даних, що може бути більш ефективним для вирішення певних задач. Мікросервіси можуть масштабуватися нерівномірно (масштабувати необхідні сервіси незалежно від інших), що підвищує гнучкість, економить час і ресурси для розробників. Використання мікросервісів має переваги, але є деякі складнощі, які необхідно враховувати, а саме: складність архітектури та інфра-

структури. Отже, вибір між монолітною архітектурою та мікросервісною архітектурою залежить від конкретних задач застосунку.

Запропонована архітектура платформи забезпечить можливість проведення моделювання КІ та симуляцію різних сценаріїв розвитку каскадних ефектів, оцінки елементів і їхніх взаємозалежностей, що впливають на вироблення рішень щодо пом'якшення наслідків каскадних подій. Завдяки інтеграції перевірених інструментів моделювання, комплексного керування даними та функцій залучення спільноти такий портал може значно покращити здатність аналізувати та пом'якшувати каскадні збої у критичних інфраструктурах.

Висновки

Запропоновано методологію моделювання і оцінки наслідків каскадних ефектів у мережі критичних інфраструктур, яка базується на парадигмі Modeling and Simulation — M&S. Ця методологія дозволяє представити КІ в різних робочих станах залежно від мети та об'єму досліджень.

Надано загальну архітектуру інтегрованої платформи, яка залучає розробки існуючих інструментів open sources та frameworks для моделювання та симуляції каскадних ефектів. Запропонована архітектура базується на розподіленій структурі, яка може бути швидко реалізована завдяки стандартам сумісності даних при роботі з різними інструментальними засобами моделювання та інтерфейсів їхньої взаємодії.

Представлено можливий склад програмного забезпечення й інструментальних засобів, який відповідає функціональності проєкту «SACE-24» і сприяє швидкому створенню та реалізації технології сценарного аналізу каскадних ефектів у взаємодіючих критичних інфраструктурах.

1. Modeling and simulation. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Modeling_and_simulation

2. Roberto Setola, Vittorio Rosato, Elias Kyriakides, Erich Rome Editors: Managing the Complexity of Critical Infrastructures. A Modelling and Simulation Approach ISBN 978-3-319-51042-2 ISBN 978-3-319-51043-9 (eBook). DOI 10.1007/978-3-319-51043-9. P. 300.

3. Georgi Kirov, Plamena Zlateva, and Dimiter Velev. Common Architecture for Simulation of Critical Infrastructure Interdependencies in Emergency Situations. *International Journal of Modeling and Optimization*. April 2016. Vol. 6, No. 2. P. 81–85. DOI: 10.7763/IJMO.2016.V6.508.

4. Звіт про непрямі фінансові втрати економіки внаслідок військової агресії Росії проти України станом на 1 липня 2024 року. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/30.09.24_Losses_Report-ua.pdf

5. William Tolone, Seok-Won Lee, Wei-Ning Xiang, Joshua Blackwell, Cody Yeager, Andrew Schumpert and Wray Johnson. An integrated methodology for critical infrastructure modeling and simulation. URL: https://dl.ifip.org/db/conf/ifip11-10/cip2008/ToloneLXBYSJ08.pdf

6. Loveˇcek T., Straková L., Kampová K. Modeling and Simulation as Tools to Increase the Protection of Critical Infrastructure and the Sustainability of the Provision of Essential Needs of Citizens. Sustainability. 2021. **13**. 5898. https://doi.org/10.3390/su13115898.

7. Kirov G., Zlateva P., and Velev D. Software Architecture for Rapid Development of HLA-Integrated Simulations for Critical Infrastructure Elements under Natural Disasters. *International Journal of Innovation, Management and Technology.* August 2015. Vol. 6, No. 4.

8. Charles McLean Y. Tina Lee Dr. Sanjay Jain Dr. Charles Hutchings. Modeling and Simulation of Critical Infrastructure Systems for Homeland Security Applications. URL: https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-f3de19ca7b535ba3207a5be512241f84/pdf/GOVPUB-C13-f3de19ca7b535ba3207a5be512241f84.pdf

9. Boychenko A.V., Senchenko V.R. An approach to development of cyberattack scenarios for digital substations. Cybersecurity of energy. Scientific-practical conference materials, May 29, 2024. Kyiv: PIMEE NAS of Ukraine, 2024. 121 p.

10. Сенченко В.Р., Бойченко А.В., Коваль О.В., Бисько Р.М., Хоменко О.М. Огляд методів і технологій сценарного аналізу каскадних ефектів. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних.* 2024. Т. 26, № 1. С. 24–54. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308506

11. Хоменко О.М., Сенченко В.Р., Коваль О.В. Мережевий підхід при дослідженні каскадних ефектів критичних інфраструктур. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2024. Т. 26, № 2. С. 44–71. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.2.316908.

12. IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation–Application Protocols. URL: https://standards.ieee.org/ieee/1278.1/4949/

13. Henrik Hassel, Jonas Johansson, Alexander Cedergren, Linn Svegrup, Björn Arvidsson: Method to study cascading effects. URL: https://casceff.eu/media2/2016/02/D2.1-Deliverable_Final_Ver2_PU.pdf

14. Functional mockup interface python Python-igraph. URL: https://github.com/igraph/python-igraph/blob/main/src/_igraph/graphobject.c

15. Django CMS. URL: https://www.django-cms.org/en/

16. Software for Complex Networks. URL: https://networkx.org/documentation/latest/

17. Simpy. URL: https://pypi.org/project/simpy/

18. SimPy gitlab. URL: https://gitlab.com/team-simpy/simpy/

19. NetLogo. URL: https://ccl.northwestern.edu/netlogo/hubnet.html

20. NetLogo 6.4.0 User Manual. URL: https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/NetLogoManual.pdf

21. Quantum GIS. URL: https://qgis.org/

22. OpenStreetMap. URL: https://www.openstreetmap.org/#map=6/48.54/31.17

23. OpenModelica. URL: https://github.com/OpenModelica/OpenModelica/releases/

24. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach.

25. RAIL Resilience Assessment and Improvement Tool. URL: https://github.com/search?q= Resilience +Assessment &type=pullrequests

26. Geospatial Risk and Resilience Assessment Platform — GRRASP. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu /geospatial-risk-and-resilience-assessment-platform-grrasp_en

27. Geosconsulting. URL: https://github.com/geosconsulting/grrasp

28. OpenLayers v10.4.0. URL: https://openlayers.org/

29. Drupal. URL: https://new.drupal.org/home

30. Resilience Assessment. URL: https://github.com/search?q=Resilience+Assessment+&type= repositories

31. Anylogic. URL: https://www.anylogic.com/s/download-free-simulation-software-for-education/

32. Optimization with OpenModelica: https://openmodelica.org/doc/OpenModelicaUsersGuide/ 1.17/optimization. Html

33. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. URL: https://protege.Stanford.edu/

34. Releases Repast/repast.simphony: https://github.com/Repast/repast.simphony/releases

35. Gephi — The Open Graph Viz Platform: https://gephi.org/

36. PostGIS and the Geography Type. URL: https://www.crunchydata.com/blog/postgis-and-the-geography-type

37. The JavaScript library for bespoke data visualization. URL: https://d3js.org/

Надійшла до редакції 27.04.2025