

УДК 004.94:621.311.1

DOI: 10.31673/2412-9070.2025.050938

О. М. ХОМЕНКО¹, аспірант;

ORCID: 0000-0003-1964-1097

О. В. КОВАЛЬ^{1,2}, доктор техн. наук, професор,

ORCID: 0000-0003-0991-6405

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»²Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ

ПОБУДОВА СЦЕНАРІЇВ РОЗВИТКУ КАСКАДНИХ ЗБОЇВ В ІНФРАСТРУКТУРІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

Дослідження сценаріїв каскадних збоїв у критичній інфраструктурі (електромережі) відіграє важливу роль для прийняття рішень у подібних ситуаціях, використовуючи існуючий досвід для зменшення негативних наслідків на компоненти системи. Процес моделювання та симуляції є складним та потребує великої кількості ресурсів, а обсяг даних стрімко збільшується в залежності від кількості компонентів та зв'язків між ними, тому виникає потреба у формалізації даних для подальшого зберігання, обробки та використання в аналітичних моделях. У статті описуються можливості використання онтологічної моделі для аналізу каскадних ефектів в електромережі. Онтологічна модель використовується для опису структури мережі, зв'язків між компонентами електромережі та їхніх характеристик в момент часу сценарію. Розроблена модель допомагає користувачу формалізувати інформацію про роботу електромережі, що є зрозумілою для людини та машини. Визначені семантичні правила використовуються для перевірки даних та логічних висновків, що полегшує процес розуміння електромережі у визначеному сценарії. Визначена структура мережі у вигляді графу полегшує візуальне сприйняття зв'язків між компонентами, а опис їхніх характеристик підвищує рівень деталізації моделі. Розроблена модель має можливість інтегруватися з різними джерелами даних у предметній області, що визначаються за допомогою концептів та логічних зв'язків між ними. Модель може бути розширена та доповнена додатковими концепціями та правилами відповідно до вимог користувача. Розроблений метод та онтологічна модель може бути інтегрована з програмними засобами для створення інструменту для роботи з даними відповідно до потреб користувача.

Ключові слова: критична інфраструктура; електромережа; каскадний збій; каскадний ефект; блекаут; онтологія; графи; модель потоку потужності; моделювання сценаріїв; програмне забезпечення.

Вступ

Критична інфраструктура – складні системи, що забезпечують надання послуг, які є важливими для суспільства. Робота значної частини об'єктів залежить від безперервного забезпечення електроенергією. Відключення електроенергії може спричинити ланцюг подій – каскадний ефект, що негативно впливає на роботу в залежних або суміжних сферах. Результати каскадного ефекту мають серйозні наслідки:

1) **Блекаут в Індії 2012 року.** Блекаут 30 липня 2012 року тривав близько 13,5 годин та вплинув на понад 400 мільйонів людей. Блекаут 31 липня 2012 року вплинув на понад 620 мільйонів людей [1].

2) **Блекаут 14-16 серпня 2003 року в електромережах США та Канади.** Блекаут вплинув приблизно на 55 мільйонів людей: 10 мільйонів людей у південному та центральному Онтаріо та 45 мільйонів людей у восьми штатах США [2].

© Хоменко О. М., Коваль О. В., 2025

3) **Блекаут в Італії 2003 року.** 28 вересня 2003 року в Італії відбувся блекаут, що вплинув на близько 56 мільйонів людей [3].

4) **Блекаут в Південній Австралії 28 вересня 2016 року.** Блекаут в Південній Австралії стався внаслідок шторму 28 вересня 2016 року, що пошкодив інфраструктуру передавання електроенергії, 850000 споживачів штату втратили електроенергію [4].

5) **Блекаут 31 березня 2015 року в Туреччині.** Блекаут в електромережі Туреччини стався о 09:36 31 березня 2015 року в результаті послідовності подій, що вплинуло на значну кількість споживачів [5].

6) **Блекаут в Україні 20 травня 2022 року.** Вплинув на близько 677 населених пунктів, близько 635,8 тисячі споживачів [6].

Каскадні збої - небезпечне явище в електромережах, що виникає внаслідок різних чинників (погодні явища, людський фактор), тому важливо аналізувати існуючі сценарії для розуміння розвитку каскадного збою та можливі шляхи для зменшення їхніх наслідків за допомогою програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дані про роботу електромережі є обмеженими або недоступними для аналізу у зв'язку з підвищеним рівнем захисту роботи об'єктів критичної інфраструктури, тому виникає потреба у створенні синтетичних даних, які описують роботу системи під час каскадного ефекту та можуть бути використані для аналізу та створення бази знань.

При виникненні збоїв на підстанції або лінії електропередачі електроенергія розподіляється відповідно до законів Кірхгофа та Ома, що ігноруються у простих топологічних моделях та може призвести до помилкових висновків [7]. Каскадні збої в електричних мережах поширюються не локально: наступний збій може виникнути далеко від попереднього, що ускладнює моделювання процесу [8]. При дослідженні електромереж використовується модель потоку потужності (Power Flow Analysis), що відіграє важливу роль при проектуванні системи. Електромережа моделюється у вигляді графу, який складається з:

- Вузлів (Nodes) - навантаження, генератори та шунти.
- Гілок (Branches) – трансформатори та лінії електропередачі.

Метою аналізу потоку потужності є обчислення для кожної шини:

- Величини напруги (voltage magnitude, $|V|$).
- Кута напруги (voltage phase angle, δ).
- Реальної потужності (injected real power, P).
- Реактивної потужності (injected reactive power, Q).

Для кожної шини мережі є задані дві з цих чотирьох величин, а інші дві є невідомими. В залежності від того, які дві величини вказані, кожна із шин може бути класифікована до однієї із трьох категорій [9]:

- Slack bus – шина, для якої задано величину напруги та кут напруги, а реальна і реактивна потужність невідомі (обчислюються).
- PQ bus – шина, для якої задана реальна та реактивна потужність та невідомі (обчислюються) величина напруги та кут напруги.
- PV bus – шина, для якої визначено величину напруги та вхідну реальну потужність та невідомі (обчислюються) реактивна потужність та кут напруги.

Система описується у вигляді рівнянь для активної та реактивної потужності, які можливо розв'язати за допомогою чисельних методів (наприклад, Метод Ньютона-Рафсона):

$$P_i = \sum_{k=1}^N |V_i| |V_k| (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^N |V_i| |V_k| (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}), \quad (2)$$

де G - дійсна складова повної провідності (conductance); B - уявна складова повної провідності (susceptance); $\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k$ - різниця фазових кутів між вузлом i та k .

Для симуляції сценаріїв роботи електромережі при виникненні каскадних збоїв використовуються фізичні моделі та ймовірнісні моделі [10, 11]. Параметри системи змі-

нюються відповідно до визначеного розподілу (наприклад, рівномірний або нормальний розподіл):

- Значення активного та реактивного опору лінії електропередачі змінюються в межах 80% і 120% від їхніх початкових значень.
- Значення напруги для генераторів змінюється в інтервалі [1,00, 1,05].
- Активна потужність для генераторів змінюється в межах 10% від початкових значень.
- Активна потужність та реактивна потужність для шин із навантаженням змінюються випадковим чином в межах 10% від початкових значень.

Електромережі мають захисні механізми, які застосовуються для стабілізації їхньої роботи при незначних збоях. Для покращення процесу прийняття рішень при виникненні збоїв оператори електромереж повинні розуміти можливі шляхи розвитку збоїв та підходи до стабілізації роботи мережі, тому доцільно проводити аналіз роботи системи при різних умовах для виявлення потенційно-небезпечних випадків. Для моделювання та аналізу сценаріїв каскадних збоїв в електромережі використовується каскадна модель збоїв на основі потоку потужності змінного струму [11], для аналізу стійкості електромереж в роботі використовується модель каскадних відмов змінного струму, що включає механізми захисту електромережі [12].

Для побудови сценаріїв каскадних збоїв в електромережі необхідно формалізувати предметну область, на якій моделюються / симулюються сценарії каскадних збоїв. З метою формалізації цієї предметної області можуть використовуватися різні підходи та інструменти [20, 21, 22]. Unified Modeling Language (UML) - стандартизований спосіб проєктування, документації та візуального представлення складних систем. UML має недоліки: складність у проєктуванні та підтримці моделей складних систем, потенційна неоднозначність при суб'єктивній інтерпретації діаграми, ризик надмірної чи недостатньої деталізації моделі. Іншим підходом є дерево сценаріїв - орієнтований граф, де кожна вершина визначає можливий стан та має унікальну батьківську вершину, а кожне ребро представляє перехід між станами. При великій кількості станів зростає складність моделі, збільшується ризик помилки при редагуванні. Business Process Model and Notation (BPMN) - стандарт візуалізації та проєктування бізнес-процесів, що забезпечує можливість отримати чітке та зрозуміле представлення робочих процесів. Моделювання бізнес-процесів за допомогою нотації BPMN надає користувачам знання про процеси, що допомагає тестувати різні сценарії, але неточності при моделюванні можуть мати негативні наслідки при реалізації моделі.

У результаті використання стандарту BPMN для опису процесів каскадних збоїв будується онтологія предметної області: розвиток каскадних збоїв в електромережах, яка надає можливість формалізувати дані, знання про предметну область та виводити нові знання на основі визначених концептів та правил. У результаті дослідження була розроблена онтологія, що складається з компонентів:

- Множина класів (Classes), наприклад: Bus, Generator, Branch, Line, Load тощо.
- Властивості (Properties), наприклад: isPartOf, hasActiveStatusValue, isConnectedTo тощо.
- Індивіди (Individuals), наприклад: Bus1, Gen1, Line1, Load1 тощо.

На основі побудованої онтології є можливість побудувати нові висновки, використовуючи механізм міркування (Reasoner) та інструменти, які мають різний набір характеристик [13], та здійснити побудову, в подальшому моделювання та симуляцію сценаріїв каскадних збоїв. Онтології рекомендовано адаптувати до змін у предметній області, оскільки ефективність онтологічної моделі залежить від актуальності та рівня деталізації знань.

Постановка завдання

Симуляція сценаріїв каскадних збоїв у великих електромережах є складним процесом, який потребує структуризації інформації та формування знань про предметну область. Здійснити цей процес можливо за використанням семантичного моделювання: побудови онтології предметної області та сценаріїв на цій онтології. Метою статті є опис методу семантичного моделювання сценаріїв каскадних збоїв в електромережах, який передбачає процес формалізації, перевірки та доповнення даних про структуру електромережі, й процеси розвитку каскадних збоїв на основі онтологічної моделі та множини правил.

Опис методу семантичного моделювання сценаріїв каскадних збоїв в електромережі

Крок 1. Побудова онтології електромережі.

Онтологія предметної області формалізується як:

$$O = \{C, P, R, S\}, \quad (3)$$

де $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ – множина класів; $P = \{P_1, \dots, P_n\}$ – множина властивостей; $R = \{R_1, \dots, R_n\}$ – множина відношень між класами та властивостями; $S = \{S_1, \dots, S_n\}$ – множина правил-обмежень.

Онтологічна модель електромережі визначається у вигляді графу, який відображає компоненти та зв'язки між ними: лінії електропередачі (PowerLine) та трансформатори (Transformer) при моделюванні визначаються як гілки (Branch) і відповідно є ребрами в графі (класи Branch і Edge є еквівалентними), що з'єднують вершини графа (isConnectedTo) – шини, до яких можуть бути підключені компоненти.

$$\text{Branch} \equiv \text{Edge}, \text{Bus} \equiv \text{Node} \quad (4)$$

$$\text{Branch} \equiv \text{PowerLine} \sqcup \text{Transformer},$$

$$\text{Branch} \sqsubseteq \text{GraphComponent}, \text{Branch} \sqsubseteq \text{GridComponent} \quad (5)$$

$$\text{Edge} \equiv \text{PowerLine} \sqcup \text{Transformer} \quad (6)$$

$$\text{Edge} \sqsubseteq \text{GraphComponent}, \text{Edge} \sqsubseteq \text{GridComponent},$$

$$\text{Node} \sqsubseteq \text{GraphComponent}, \text{Node} \sqsubseteq \text{GridComponent} \quad (7)$$

$$\text{Edge} \sqsubseteq \exists \text{ isConnectedTo. Node} \quad (8)$$

Шина є компонентом графу (GraphComponent), мережі (GridComponent) та має з'єднання (hasConnectionWith) з генератором (Generator), навантаженням (Load), лінією електропередачі (PowerLine), трансформатором (Transformer).

$$\text{Bus} \sqsubseteq \text{GraphComponent}, \text{Bus} \sqsubseteq \text{GridComponent} \quad (9)$$

$$\text{Bus} \sqsubseteq \exists \text{ hasConnectionWith. (Generator} \sqcup \text{Load} \sqcup \text{PowerLine} \sqcup \text{Transformer)} \quad (10)$$

Шина містить властивості з дробовим значенням (double): hasActivePowerMWValue – значення активної потужності в мегават (МВт), hasKiloVoltValue – значення напруги в кіловольт (кВ), hasReactivePowerMVarValue – значення реактивної потужності, що вимірюється в мегавольт-амперах реактивних (MVar), hasVoltageAngleDegreeValue – кут напруги (градуси). Значення hasKiloVoltValue, hasVoltageAngleDegreeValue можуть бути ≥ 0 .

$$\text{Bus} \sqsubseteq \exists \text{ hasActivePowerMWValue. double} \quad (11)$$

$$\text{Bus} \sqsubseteq \exists \text{ hasKiloVoltValue. double, Range: double} [\geq "0.0"^^\text{double}] \quad (12)$$

$$\text{Bus} \sqsubseteq \exists \text{ hasReactivePowerMVarValue. double} \quad (13)$$

$$\text{Bus} \sqsubseteq \exists \text{ hasVoltageAngleDegreeValue. double, Range: double} [\geq "0.0"^^\text{double}] \quad (14)$$

У властивостях можуть вказуватися додаткові обмеження для даних (інтервал або множина допустимих значень), що допомагає виявити потенційні помилки. Після визначення класів, властивостей об'єктів, властивостей даних створюються екземпляри електромережі. На Рис.1 наведено опис фрагменту онтології електромережі.

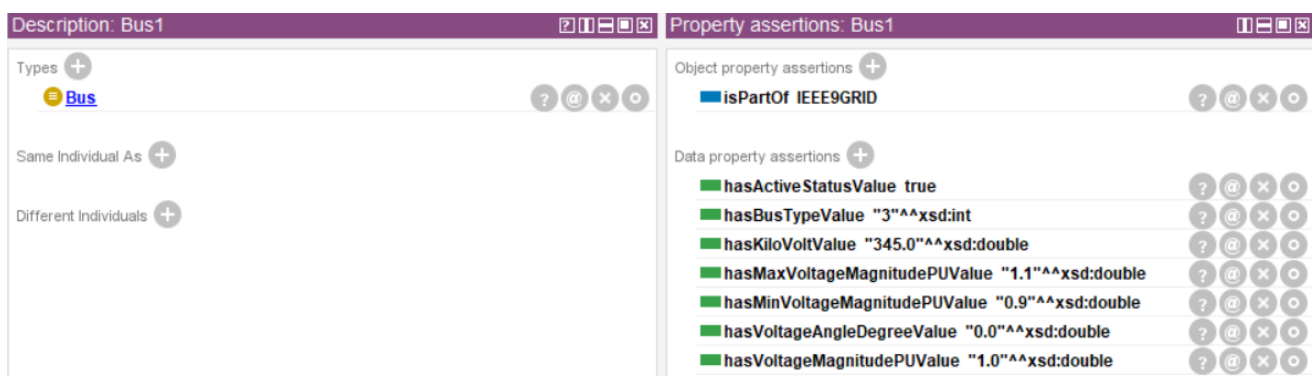


Рис. 1. Опис екземпляра Bus1 в онтології електромережі

Тестова мережа (IEEE9GRID) складається з 9 шин, що описані за допомогою екземплярів: Bus1, Bus2, Bus3, Bus4, Bus5, Bus6, Bus7, Bus8, Bus9; 3 генератори: Gen1, Gen2, Gen3; 9 ліній електропередачі: Line1, Line2, Line3, Line4, Line5, Line6, Line7, Line8, Line9; 3 навантаження: Load1, Load2, Load3.

Крок 2. Перевірка коректності та повноти онтології.

Резонер Pellet [15] в редакторі онтології Protégé [14] перевіряє коректність метаданих, які описують онтологію, виявляє протиріччя та виводить висновки про предметну область.

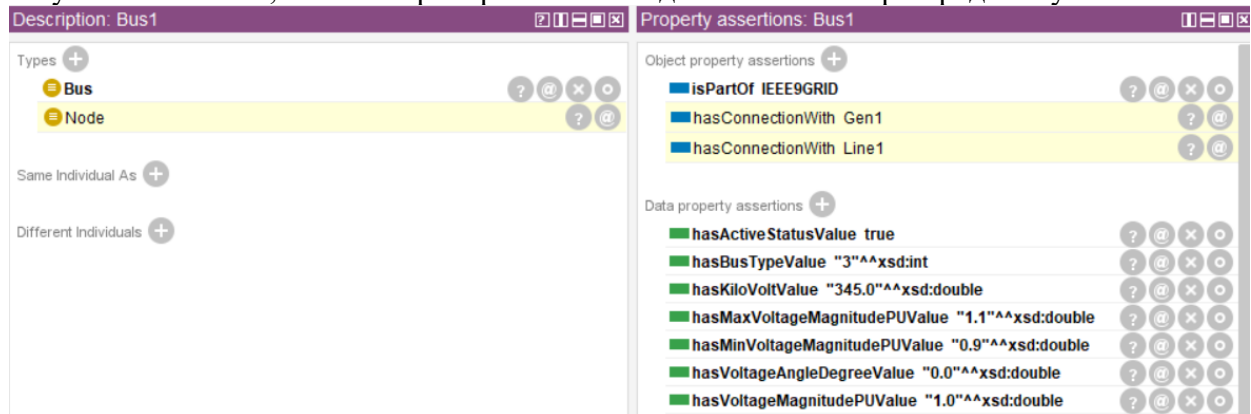


Рис. 2. Виведення висновків для екземпляра Bus1

При від'ємному значенні напруги (-345.0 кВ) резонер виводить помилку.

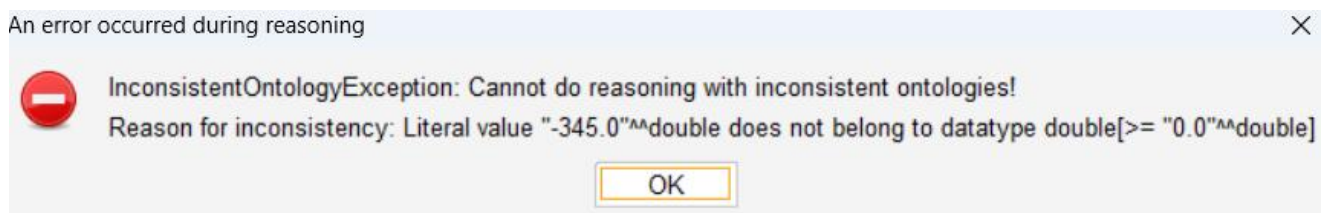


Рис. 3. Помилка при від'ємному значенні напруги для екземпляра Bus1

Дані про компоненти електромережі можуть інтегруватися з різних джерел, то доцільно додатково встановити правила перевірки формату вхідних даних за допомогою SHACL [16]. Наприклад, за допомогою правил обмежується кількість властивостей для екземплярів класу: для класу Line обов'язковими є властивості: isPartOf, hasReactancePUValue, hasResistancePUValue, hasShuntSusceptancePUValue, isConnectedTo, що визначаються за допомогою обмежень: minCount, maxCount.

```
powergrid:LineShape
a sh:NodeShape ;
sh:targetClass powergrid:PowerLine ; # Applies to all PowerLines
sh:property [
  sh:path powergrid:isPartOf ;
  sh:minCount 1 ;
  sh:maxCount 1 ;
] ;
sh:property [
  sh:path powergrid:isConnectedTo ;
  sh:minCount 2 ;
  sh:maxCount 2 ;
] ;
sh:property [
  sh:path powergrid:hasReactancePUValue ;
  sh:datatype xsd:double ;
  sh:minCount 1 ;
  sh:maxCount 1 ;
] ;
sh:property [
  sh:path powergrid:hasResistancePUValue ;
  sh:datatype xsd:double ;
  sh:minCount 1 ;
  sh:maxCount 1 ;
] ;
sh:property [
  sh:path powergrid:hasShuntSusceptancePUValue ;
  sh:datatype xsd:double ;
  sh:minCount 1 ;
  sh:maxCount 1 ;
] ;
sh:closed false ;
sh:ignoredProperties ( rdf:type owl:topDataProperty owl:topObjectProperty )
```

Рис. 4. Обмеження для екземплярів класу лінії електропередачі в електромережі, які візуалізовані за допомогою shacl-playground [17]

```

<!-- http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#Line1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#Line1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#PowerLine"/>
  <untitled-ontology-56:isConnectedTo rdf:resource="http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#Bus1"/>
  <untitled-ontology-56:isConnectedTo rdf:resource="http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#Bus4"/>
  <untitled-ontology-56:isConnectedTo rdf:resource="http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#Bus5"/>
  <untitled-ontology-56:isPartOf rdf:resource="http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#IEEE9GRID"/>
</owl:NamedIndividual>

```

Validation Report

Success

No

Errors found

- http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#Line1:
 - http://www.semanticweb.org/alexandr/ontologies/2025/2/untitled-ontology-56#isConnectedTo:
 - More than 2 values

Рис. 5. Результат валідації онтології з помилковими даними

В екземплярі Line1 класу PowerLine визначено властивість isConnectedTo 3 рази (лінія електропередачі під'єднана до Bus1, Bus4, Bus5), то виникає відповідно помилка при валідації згідно визначених обмежень SHACL. Доповнення онтологічної моделі правилами SHACL покращує якість даних, що полегшує процес аналізу предметної області та пошуку помилок.

Крок 3. Побудова сценаріїв каскадних збоїв електромережі на основі онтології.

Сценарій предметної області може визначатися, використовуючи нотацію BPMN [19]:

$$Ont(SD)_{BP} = \langle C^{(E)}, An^{(C)}, Rel^{(H)}, T^{(A)}, Ax^{(S)}, Rul^{(S)}, Ex^{(C)} \rangle, \quad (15)$$

де $C^{(E)}$ – підмножина класів $\langle \text{Classes} \rangle$; $An^{(C)}$ – підмножина $\langle \text{Annotation Property} \rangle$; $Rel^{(H)}$ – підмножина відношень $\langle \text{Object properties} \rangle$; $T^{(A)}$ – підмножина атрибутів $\langle \text{Data properties} \rangle$ для опису властивостей класів; $Ax^{(S)}$ – підмножина аксіом $\langle \text{Axioms} \rangle$; $Rul^{(S)}$ – правила логічного висновку; $Ex^{(C)}$ – множина екземплярів ($\langle \text{Instances} \rangle$) класів.

При виникненні збоїв в електромережі виконується множина дій (Action) для стабілізації роботи мережі, які визначаються за допомогою класів в онтології. Події (Event), які виникають у процесі моделювання та симуляції каскаду в електромережі, поділяються на категорії:

- Збій (Failure) – початковий збій компонентів (визначаються як неактивні).
- Поділення мережі на острови (Islanding) – утворюються автономні підмережі.
- Стабілізація мережі (NetworkStability) – мережа перебуває у стабільному стані.
- Мережа без збоїв (NoFailure).
- Знеструмлення (Blackout) – мережа відключена.
- Початок каскаду (CascadeStarted) – в результаті збоїв почався каскад.
- Продовження каскаду (CascadeContinues) – каскадні збої впливають на роботу електромережі та можуть викликати множину послідовних подій.
- Завершення каскаду (CascadeFinished) – робота електромережі була стабілізована або вона була знеструмлена для захисту її компонентів.

Онтологічна модель доповнюється важливими характеристиками, які відображають послідовність зміни в роботі електромережі:

- Ідентифікатором сценарію (hasscenario_number).
- Ідентифікатором похідного сценарію (hassubscenario_number).
- Назвою похідного сценарію (hassubscenario_name), що описує процес, який відбувається в острові.
- Ідентифікатором острова (hasisland_id) – мережа може бути поділена на множину островів.
- Ідентифікатором первинного острова (hasparent_island_id) – острів, який поділився на декілька островів.

На основі даних моделювання та симуляції створюються екземпляри компонентів електромережі, що на певному етапі відносяться до відповідного сценарію та характеризуються

зв'язками між ними. За допомогою SWRL [18] онтологічна модель доповнюється новими знаннями, що є корисними для перевірки цілісності сценарію, виявлення протиріч та доповнення існуючих даних, наприклад:

- Визначення початку каскадного ефекту (початковий острів поділився на множину островів - підмереж):

$$\text{Island}(\text{?isld1}) \wedge \text{hasChild}(\text{?isld1}, \text{?p_isld}) \wedge \text{hasisland_id}(\text{?isld1}, \text{?id}) \wedge \text{hasparent_island_id}(\text{?isld1}, \text{?pid}) \wedge \text{CascadeStarted}(\text{?isl}) \wedge \text{swrlb:equal}(\text{?id}, \text{?pid}) \rightarrow \text{hasEvent}(\text{?isld1}, \text{?isl})$$

- Визначення процесу каскаду (продовження каскаду). Каскадний ефект вже почався, але ще не закінчився:

$$\text{Island}(\text{?isld1}) \wedge \text{hasChild}(\text{?isld1}, \text{?c_isld}) \wedge \text{hasParent}(\text{?isld1}, \text{?p_isld}) \wedge \text{CascadeContinues}(\text{?isl}) \rightarrow \text{hasEvent}(\text{?isld1}, \text{?isl})$$

- Визначення шин, які були відключенні у острові:

$$\text{Island}(\text{?isl}) \wedge \text{Bus}(\text{?b}) \wedge \text{hasPart}(\text{?isl}, \text{?b}) \wedge \text{hasBusType}(\text{?b}, \text{?tr}) \wedge \text{swrlb:equal}(\text{?tr}, 4) \rightarrow \text{hasTrippedBus}(\text{?isl}, \text{?b})$$

Крок 4. Моделювання роботи електромережі.

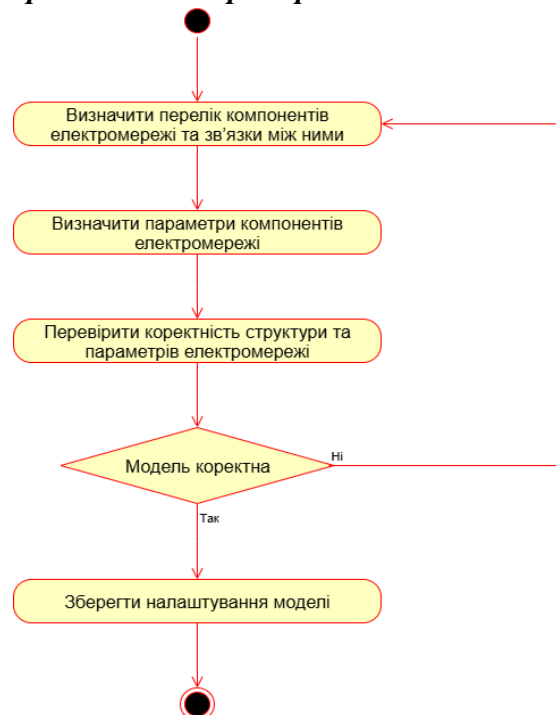


Рис. 6. Діаграма діяльності, що описує процес створення моделі електромережі

Процес моделювання роботи електромережі складається з наступних кроків:

- Визначити перелік компонентів та зв'язки між ними, що формують структуру електромережі.

- Визначити параметри компонентів електромережі.

- Перевірити коректність структури та параметрів електромережі: аналіз результатів моделі потоку потужності та перевірка допустимих значень для компонентів.

Крок 5. Симуляція сценаріїв каскадних збоїв в електромережі.

Після визначення структури електромережі та параметрів компонентів створюються сценарії, які визначають початкові збої компонентів, наприклад: на початку збій виникає в гілках з індексом 5 та 7 (компоненти визначаються як неактивні). Сформовані сценарії запускаються в моделі симуляції, щоб визначити стани та параметри компонентів на кожному етапі розвитку можливого каскадного ефекту.

В результаті були отримані висновки про острів з ідентифікатором 5 (Island5).

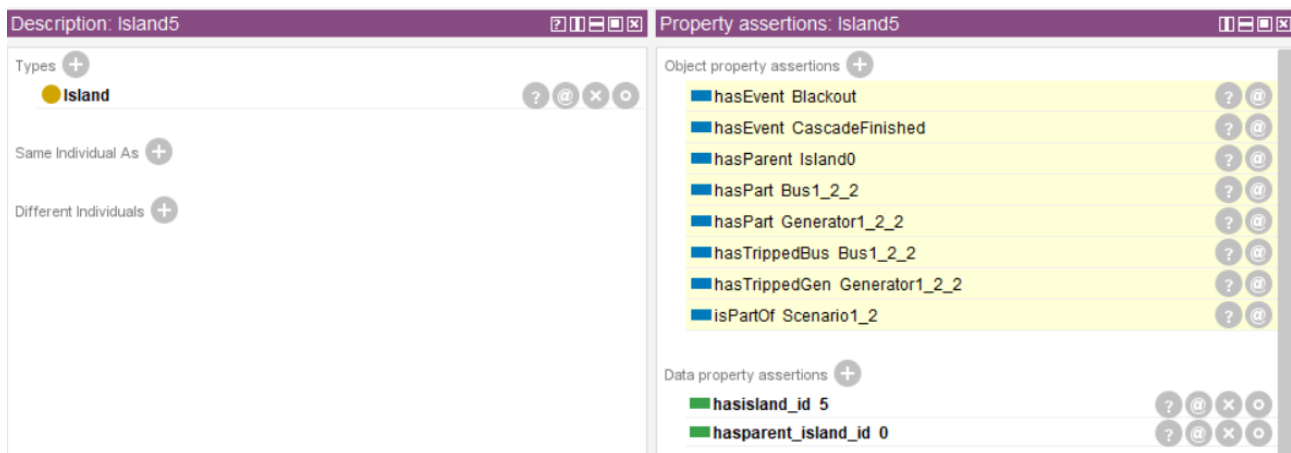


Рис. 7. Результат висновків про острів 5 (Island5)

Острів 5 (Island5) має характеристики:

- Події:

- 1) Знеструмлення.
- 2) Каскад закінчився.

- Компоненти:

- 1) Шина Bus_1_2_2.
- 2) Генератор Generator1_2_2.

- Первинний острів – острів, який поділився на менші острови:

- 1) Island0.

- Сценарій, де використовується острів:

- 1) Scenario1_2 – основний сценарій з ідентифікатором 1, та похідним сценарієм з ідентифікатором 2.

- Компоненти, які були відключені:

- 1) Шина Bus_1_2_2.
- 2) Генератор Generator1_2_2.

В результаті моделювання сценарію, де на початку виводяться із ладу гілки з індексом 5 та 7, утворюється множина островів: початкова електромережа – це острів Island0, який після збою поділився на 2 острови Island1 та Island5 (знеструмлений). Island1 поділився на 3 острови: Island2 (стабілізований), Island3 (знеструмлений), Island4, (знеструмлений). Результуюча модель сценарію представляє опис структури, параметрів системи, послідовність розвитку каскадного збою, вплив на об'єкти, що доповнено логічними висновками на основі правил.

Висновки

У статті представлено опис та приклад використання методу для формалізації, перевірки та доповнення даних про структуру електромережі та процеси розвитку каскадних збоїв на основі онтологічної моделі та множини правил. Розроблений метод потенційно покращує якість даних симуляції, що є формалізованими та зрозумілими для людини та машини, яка досягається за допомогою процесів виявлення потенційних помилок в метаданих опису предметної області. Результуючі дані, які доповнені додатковою інформацією, можуть використовуватися у аналітичних моделях, де консистентність вхідних даних є важливою вимогою.

В результаті проведення моделювання та симуляції сценарію каскадних збоїв в електромережі було отримано результат про стан її роботи: виведення із ладу компонентів, поділ на підмережі (острови), застосування захисних механізмів для стабілізації її роботи та сформулювати відповідні рішення щодо усунення каскадного ефекту.

Список літератури

1. 2012 India blackouts. [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2012_India_blackouts

2. *Northeast blackout of 2003*. [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Northeast_blackout_of_2003
3. *2003 Italy blackout*. [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2003_Italy_blackout
4. *2016 South Australian blackout*. [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2016_South_Australian_blackout
5. *2015 Turkey blackout*. [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2015_Turkey_blackout
6. *Робота енергосистеми України станом на 20 травня 2022 року*. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/robota-energositsemi-ukrayini-stanom-na-20-travnya-2022-roku>
7. Hines P., Cotilla-Sanchez E., Blumsack S. Do topological models provide good information about electricity infrastructure vulnerability? [Електронний ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1002.2268>
8. Korkali M., Veneman J. G., Tivnan B. F., Hines P. D.H. Reducing Cascading Failure Risk by Increasing Infrastructure Network Interdependency. [Електронний ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1410.6836>
9. Afolabi O. A., Ali W. H., Cofie P., Fuller J., Obiomon P., Kolawole E. S. Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies. 2015, *Energy and Power Engineering*, 7, 509-523. doi: 10.4236/epe.2015.710048
10. Guo Z., Sun K., Su X., Simunovic S. A review on simulation models of cascading failures in power systems. *iEnergy*, vol. 2, no. 4, pp. 284-296, December 2023, doi:10.23919/IEN.2023.0039
11. Gjorgiev B., David A. E., Sansavini G. Cascade-risk-informed transmission expansion planning of AC electric power systems. *Electric Power Systems Research*, Volume 204, 2022, 107685, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107685>
12. Noebels M., Preece R., Panteli M. AC Cascading Failure Model for Resilience Analysis in Power Networks. *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 374-385, March 2022, doi: 10.1109/JSYST.2020.3037400
13. Dentler K, Cornet R, ten Teije A, de Keizer N. Comparison of reasoners for large ontologies in the OWL 2 EL profile. *Semantic Web*. 2011;2(2):71-87. doi:10.3233/SW-2011-0034
14. Protégé. [Електронний ресурс]. URL: <https://protege.stanford.edu/>
15. Sirin E., Parsia B., Pellet: An OWL DL Reasoner. [Електронний ресурс]. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-104/30Sirin-Parsia.pdf>
16. *Shapes Constraint Language (SHACL)*. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.w3.org/TR/shacl/>
17. SHACL Playground. [Електронний ресурс]. URL: <https://github.com/zazuko/shacl-playground>
18. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.w3.org/submissions/SWRL/>
19. Коваль О.В. Методи та засоби комп'ютерного моделювання сценаріїв аналітичної діяльності: дис. ... д-ра техн. наук: 01.05.02. Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2021. 440 с.
20. Сенченко В.Р., Бойченко А.В., Коваль О.В., Хоменко О.М. Методологія і архітектура платформи моделювання взаємозалежностей у критичних інфраструктурах при виникненні каскадних ефектів. Реєстрація, зберігання і обробка даних, ІПРІ НАН України, 2025. Том 27. № 1. С. 28-41. DOI: 10.35681/1560-9189.2025.27.1.335624
21. О. М. Хоменко, В. Р. Сенченко, О. В. Коваль. Мережевий підхід при дослідженні каскадних ефектів критичних інфраструктур. Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2024. Том 26. № 2. С. 44-72. DOI 10.35681/1560-9189.2024.26.2.316908
22. 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 обробка даних, 2024. Том 26. № 1. С. 24 – 54. DOI 10.35681/1560-9189.2024.26.2.316908

O. Khomenko, O. Koval

CONSTRUCTION OF SCENARIOS FOR THE DEVELOPMENT OF CASCADE FAILURES IN THE POWER GRID INFRASTRUCTURE

The study of cascading failure scenarios in critical infrastructure (power grid) plays an important role in decision-making in such situations, using existing experience to reduce negative consequences for system components. The modeling and simulation process is complex and requires a large amount of resources, and the volume of data increases rapidly depending on the number of components and connections between them, therefore there is a need to formalize data for further storage, processing and use in analytical models. The article describes the possibilities of using an ontological model to analyze cascading effects in the power grid. The ontological model is used to describe the structure of the network, connections between power grid components and their characteristics at the time of the scenario. The developed model helps the user to formalize information about the operation of the power grid that is understandable to humans and machines. The defined semantic rules are used to verify data and draw logical conclusions, which facilitates the process of understanding the power grid in a given scenario. The defined network structure in the form of a graph facilitates the visual perception of the connections between components, and the description of their characteristics increases the level of detail of the model. The developed model has the ability to integrate with various data sources in the subject area, which are defined using concepts and logical connections between them. The model can be expanded and supplemented with additional concepts and rules according to user requirements. The developed method and ontological model can be integrated with software tools to create a tool for working with data according to the user's needs.

Keywords: critical infrastructure; power grid; cascading failure; cascade effect; blackout; ontology; graphs; power flow model; scenario modeling; software.
