

МОДЕЛЬ ТА МЕТОД АНАЛІЗУ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ НАНЕСЕННІ НЕПРОЕКТНИХ ЗБУРЕНЬ**М. В. Максимов¹, В. І. Кривда², В. О. Суворов²**¹НДЦ ЗСУ "Державний океанаріум" Інституту Військово-Морських Сил,²Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Інформаційні та імітаційні моделі в сучасному світі є важливим інструментом для аналізу, проектування та оптимізації різноманітних систем. Одним з ефективних підходів до їх побудови є використання теорії графів. У цій статті розглянемо основні принципи побудови інформаційної моделі з використанням графів та метод аналізу працездатності цієї моделі при нанесенні неprojektних збурень.

В умовах зростаючих вимог до працездатності енергетики, концепція розроблення енергетичної системи у вигляді ярусного графу стає дедалі більш актуальною та перспективною. Імітаційна модель у вигляді ярусного графу може надати ефективний інструмент для оптимізації постачання енергії та забезпечення стійкості та надійності системи.

За допомогою ярусного графу можна візуалізувати ієрархію різних джерел енергії, включаючи відновлювальні джерела, традиційні види палива, а також енергоефективні технології. Це сприятиме розумінню взаємодії між різними компонентами системи та дозволить вдосконалити їхню інтеграцію.

Ключові слова: електроенергетична система, працездатність електроенергетичної системи, оцінка працездатності системи електропостачання, випадкові та заплановані збурення електроенергетичної системи, генерація, трансформаторні підстанції, споживачі електроенергії.

Вступ

У високотехнологічному світі сучасності, де безперервне та надійне електропостачання є критично важливим для різноманітних галузей життя, вивчення моделей та методів аналізу працездатності електроенергетичних систем стає питанням першочергового значення.

Велика кількість споживачів електроенергії, постійно зростаючі потреби у новітніх технологіях ставлять під серйозний тиск енергетичну інфраструктуру, змушуючи її адаптуватися до нових викликів і забезпечувати найвищий рівень ефективності та надійності.

Розвиток сучасних технологій у сфері енергетики вимагає постійного вдосконалення аналітичних і прогностичних методів, що дозволяють оперативно реагувати на зміни в системі та максимально ефективно управляти її ресурсами для забезпечення потреб споживачів.

Стабільність енергопостачання не лише забезпечує безперервну роботу промислових підприємств та комерційних об'єктів, а й гарантує безпеку та комфорт для мешканців та споживачів.

Дослідження та вдосконалення моделей ана-

лізу працездатності систем електроживлення стає критично необхідним для забезпечення працездатності та ефективності енергетичної інфраструктури в умовах постійно зростаючих вимог та викликів технологічного прогресу.

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Моделювання електроенергетичних систем має величезну актуальність у світлі сучасних викликів та тенденцій в галузі енергетики. Зростаюча свідомість щодо кліматичних змін, зменшення резервів традиційних джерел палива та стрімке розширення використання відновлювальних джерел енергії створюють невідкладну потребу в розробці інтелектуальних стратегій управління електроенергетичними системами.

У світлі глобальних зобов'язань щодо скорочення викидів [1] та переходу до сталої енергетики, моделі енергетичних систем стають ефективним інструментом для передбачення та аналізу впливу різних стратегій на середовище [2]. Розвиток технологій, таких як сонячна та вітряна енергія, акумуляторні системи, інтелектуальні мережі, вимагає високоточних моделей для забезпечення ефективного впровадження та оптимізації їхнього функціонування.

Крім того, моделювання стає ключовим елементом у розробці розумних мереж, де важливо передбачити та управляти змінами в споживанні електроенергії [3], адаптуючи систему до коливань попиту та постачання. Це надає можливість підвищити рівень енергоефективності та забезпечити стійкість системи навіть у змінливих умовах.

У роботі [4] було запропоновано математичну модель для оцінки економічної доцільності та надійності покращення електропостачання шляхом незалежного мультиплексування. Дана модель може бути складною та вимагати великої кількості вхідних даних. Це може призвести до високої складності в обчисленнях та управлінні моделлю. В багатьох випадках, особливо на етапі розробки, може бути обмежена кількість даних для побудови та перевірки моделі, що може вплинути на її точність та достовірність.

У статті [5] була висунута концепція моделі, що використовує змішане цілочисельне лінійне програмування для короткострокового планування у сфері роздрібної торгівлі, включаючи фотоелектричну установку, вітрову турбіну та паливний елемент. Результати, отримані за допомогою інтервальної оптимізації, були порівняні з сценарієм, в якому відсутня невизначеність. Проте важливо відзначити, що невизначеність вимог була проігнорована в цьому випадку. До недоліків цієї моделі можна віднести те, що у разі великої кількості параметрів та обмежень цілочисельне лінійне програмування може потребувати великої кількості змінних, що робить модель більш складною та важко зрозумілою.

Торговці у роздрібній торгівлі виступають посередниками між виробниками та кінцевими споживачами, постачаючи електроенергію тим споживачам, які не проявляють бажання або не мають можливості брати участь у оптових ринках електроенергії [6], а також закупають електроенергію в значних обсягах і реалізують її споживачам [7]. Планування діяльності роздрібних торговців проводиться на короткостроковій або середньостроковій основі [8].

В роботі [9] запропонована ризикована двоетапна стохастична модель, що ухиляється від ризику, для короткострокового планування роздрібних торговців, тоді як контракт зі штрафом за відкличкання (CWP) і контракт з опціоном (CWO) є новими ресурсами, які використовуються для закупівлі електроенергії роздрібними продавцями [10]. Стохастичні моделі, особливо з ризиковими ухилами, можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів для ефективного вирішення. Це може стати перешкодою для реального вико-

ристання в умовах короткострокового планування.

У [11] приведено оптимізаційну модель, спрямовану на оптимізацію економічних функцій, зменшення впливу на навколишнє середовище та збільшення соціальних переваг енергетичної мережі. Економічною метою цієї моделі є максимізація прибутку після корпоративного податку, екологічною метою є мінімізація викидів парникових газів, а соціальною метою є збільшення соціальної вигоди. Але ця модель може виявитися менш гнучкою при адаптації до змін в умовах ринку чи змін у стратегії енергетичної мережі та визначення параметрів, що впливають на економіку, навколишнє середовище та соціальні показники, може бути непередбачуваним та залежати від суб'єктивних оцінок.

В статтях [12,13] розробляється модель реакції на попит, яка об'єднує ціну за час використання та стимул, для відображення змін навантаження перед та після впровадження реакції на попит. Крім цього, пропонується метод аналізу впливу покращення надійності розподільної мережі інтегрованою енергетичною системою на основі послідовного методу Монте-Карло. З точки зору точності результатів, метод Монте-Карло може вимагати великої кількості ітерацій, щоб забезпечити достатню точність, що може бути витратним за ресурсами та для великих систем метод Монте-Карло може бути обчислювальне неефективним.

Пропускна здатність системи передачі (TTC) [14] визначається як максимальна потужність, яку система може передати за врахування набору обмежень безпеки та стабільності, що визначає верхню межу можливостей системи. Доступна здатність передачі (ATC) [15] є ключовим показником, який супроводжує TTC [16] і вказує на додаткову потужність передачі від поточного стану, відображаючи резерв передачі. Недавні наукові розробки у галузі TTC і ATC вивели до виникнення єдиної теоретичної системи [17]. Вперше було запропоновано математичну модель доступної потужності постачання, яка враховує всі можливі моделі зростання навантаження, коли система досягає межі безпеки.

У науковій літературі було вдосконалено розуміння проблем управління енергією в мікрогрідах за допомогою різноманітних методів дослідження [18]. Одним з популярних методів є метод метаевристичної оптимізації [19], які дозволяють враховувати складність та велику кількість змінних у системах енергопостачання. Паралельно з цим, у вивченні управління енергетичними ресурсами мікрогрідів також використовується широкий спектр методів лінійного [20]

та нелінійного програмування [21]. Ці методи надають можливість точно моделювати та оптимізувати різні аспекти функціонування систем енергопостачання, враховуючи при цьому їхню складні структури та взаємозв'язки. Окрім того, в дослідженнях зазначається інтерес до використання теорії ігор [22], що вносить аспект конфліктів та взаємодій між різними агентами системи. Це дозволяє враховувати стратегії різних учасників у контексті управління енергетичними ресурсами мікрогридів.

У дослідженні [23] представлено оптимізаційну модель для взаємопов'язаних мультимікромереж, яка враховує загальну вартість системи та запропоновано ефективну стратегію енергоменеджменту для зниження експлуатаційних витрат систем. Для забезпечення оптимальної ефективності системи використовується ієрархічна система управління енергією, побудована на основі концепції мультиагентних систем (MAS) [24]. Модель на основі MAS дозволяє оптимально планувати роботу системи в багатовимірному просторі, в якому враховуються рішення всіх учасників [25], але з великою кількістю агентів і їхніх взаємодій може бути складно аналізувати та інтерпретувати результати моделі.

У роботі [26] було запропоновано довгострокове моделювання електропостачання, яке показує повну модель електроенергетичної системи з урахуванням різних особливостей, таких як домінування традиційної енергетики, низький рівень електрифікації селищ, дефіцит постачання енергії. Моделі довгострокового енергетичного планування, зазвичай, відзначаються широким охопленням та низьким рівнем часової деталізації з метою уникнення великої обчислювальної складності в процесі виконання завдання [27,28]. Довгострокове моделювання, хоча і є корисним інструментом для стратегічного планування енергетичної системи [29], але структура енергетики та інших сфер може швидко змінюватися через технологічні прориви або випадкові збурення, що ускладнює точне прогнозування на довгий період та призводить до втрати актуальності та ефективності моделі.

Використання вищевказаних методів моделювання стає викликом при побудові інформаційних моделей з великою кількістю вузлів. Така складність може призвести до ускладнення аналізу та взаємодії між компонентами системи. Однак, розробка інформаційної моделі електроенергетичної структури країни за допомогою теорії графів стає наочним та ефективним підходом для подальших аналізів різних показників експлуатації енергосистеми.

2. Мета та задачі дослідження

Мета статті передбачає розробити модель та метод аналізу енергосистеми за допомогою теорії графу, що дасть можливість проводити аналіз працездатності електроенергетичної системи при нанесенні непроектованих збурень.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1) розробити імітаційну модель електроенергетичної системи за допомогою теорії графів у вигляді ярусного графу.

2) розробити метод аналізу працездатності електроенергетичної системи країни при нанесенні непроектованих збурень.

3. Імітаційна математична модель електроенергетичної системи

У сучасному математичному моделюванні структур систем, особливо в контексті електроенергетичних систем, широко використовуються ярусні графи – потужний інструмент для аналізу та візуалізації взаємозв'язків між різними елементами складних систем. Ярусні графи дозволяють не лише представити структуру системи за допомогою візуальної ієрархії, але й проводити докладний аналіз її функціональних зв'язків та оптимізувати її роботу.

Для створення імітаційної моделі електроенергетичної системи було використано ярусний граф $G = (V, E)$, який включає в себе

- множину $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина вершин;

- множину $E = \{e_{1,2}, e_{2,3}, \dots, e_{i,j}\}$ – множина ребер або дуг графу.

В рамках електроенергетичних систем вершинами ярусного графу є різноманітні елементи, такі як генеруючі станції та електричні підстанції, а ребра відображають лінії передачі електроенергії.

Властивості кожної вершини графу наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Властивості вершин графу

Вершина	Кількість трансформаторів, шт.	Потужність, МВА	Активне навантаження, МВт	Напруга вузла, кВ
V1	3	250	600	750

Властивості кожного ребра графу наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Властивості ребер графу

Ребро	Довжина, км.	Марка проводу	Резервування	Напруга в лінії, кВ
e (1,30)	289	4хАСУ-400	–	750

Представимо імітаційну модель електроенергетичної системи як дискретну структуру у вигляді ярусного графу.

Крок 1. Ініціалізація моделі. Для цього проводиться зчитування даних, створення графа $G = (V, E)$, де V - множина трансформаторів підстанцій та генерації, а E - множина лінії електропередач.

Крок 2. Імітація сценарію виходу з ладу об'єкта. Для кожного об'єкта $o \in (V, E)$ виконується функція розрахунку життів за кількістю випадкових випадів цього об'єкту із загальної множини.

Крок 3. Розрахунок шляхів та аналіз. Проводиться пошук всіх можливих шляхів $P(v, z)$ (Енергооб'єктів) для кожної вершини $v \in V$ з типом "трансформатор" та напругою менше 150 кВ та розрахунок втрат для кожного шляху $p \in P$: $losses_p = \sum lineLoses_l$, де $lineLoses_l$ - втрати на лінії l .

Крок 4. Збір статистики. Проводиться розрахунок статистичних показників: середніх втрат $avgLosses = (\sum losses_p) / |P|$ та підрахунок кількості вузлів, які залишилися без шляху.

Крок 5. Виведення результатів. Проводиться запис результатів в необхідному форматі для аналізу.

Крок 6. Очищення ресурсів. Проводиться видалення об'єктів та звільнення виділеної пам'яті для кожного об'єкта системи.

Зчитування вихідних даних для ініціалізації моделі проводиться покроково за наступним алгоритмом:

Крок 1. Ініціалізація структури для зберігання даних. Проводиться створення порожніх векторів для кожного типу об'єктів електроенергетичної системи таких, як «генерація», «трансформатори», «трансформатори та генерація», «лінії», «енергооб'єкти».

Крок 2. Зчитування даних з файлу вихідних даних вузлів. Проводиться зчитування кожного рядка з файлу вихідних даних та розбір і обробка даних для кожного об'єкту, а саме: конвертація ідентифікатора об'єкта, видалення пробілів і символів, обробка назви об'єкта, конвертація інформації про кількість та потужність трансформа-

торів, обчислення навантаження та обробка даних про втрати, конвертація напруги.

Крок 3. Створення об'єктів енергетичної системи. Проводиться розгалуження умов на основі зчитаних даних: якщо об'єкт є електростанцією (визначається за даними навантаження та відсутністю трансформаторів), створюється «Генерація», якщо об'єкт є трансформатором (визначається за наявністю даних трансформатора або конкретними ідентифікаторами), створюється «Трансформатор». Далі проводиться додавання створених об'єктів до відповідних векторів.

Крок 4. Зчитування даних з файлу вихідних даних ребер. Проводиться зчитування і обробка даних для кожної лінії електропередачі, а саме: конвертація ідентифікаторів з'єднань, дистанції, резервування, втрат на лінії та максимального струму, створення об'єктів «Лінія» на основі зчитаних даних. Якщо резервування відсутнє, створюється новий об'єкт «Лінія», інакше оновлюється остання лінія у векторі «лінії» та додається лінія до векторів «лінії» та «енергооб'єкти».

Крок 5. Формування результативної структури «Вихідні дані». Проводиться створення структури «вихідні дані» та заповнення її даними з векторів.

Крок 6. Повернення оброблених даних. Функція повертає структуру «Вихідні дані», яка містить всі зчитані та оброблені дані.

4. Метод аналізу працездатності електроенергетичної системи

Використання імітаційної моделі електроенергетичної структури у вигляді ярусного графу не лише забезпечує зручний інструментарій для оцінки працездатності цієї системи при різних режимах роботи, але й відкриває широкі можливості для детального аналізу взаємодії компонентів, ідентифікації потенційних слабких місць та розробки оптимальних стратегій управління, що забезпечує ефективну та надійну роботу електроенергетичної системи в умовах сучасного енергетичного ринку в умовах військового стану.

Розглянемо детальний опис методу аналізу працездатності електроенергетичної системи.

Крок 1. Відкриття файлу для подальшого запису результатів програми.

Крок 2. Зчитування даних з вихідних файлів. Проводиться зчитування даних про електроенергетичну структуру та збереження в структурі «вихідні дані» за допомогою функції зчитування вихідних даних.

Крок 3. Формування графа електроенергетичної системи. Проводиться ідентифікація кожного елементу графа (генерація, трансформатори, лінії). Якщо ідентифікатор лінії співпадає з іден-

тифікатором трансформатора або генерації, створюється з'єднання між ними.

Крок 4. Імітація різних сценаріїв виходу з ладу елементів графа. Проводиться різноманітна кількість ітерацій, що імітують вихід з ладу елементів, зменшуючи життя випадково вибраних елементів в системі на одиницю. На кожній ітерації відновлюється початковий стан життя елементів.

Крок 5. Пошук шляхів до генерації. Для кожного вузла графа з напругою споживача викликається функція «пошук шляхів» для знаходження всіх можливих шляхів від споживача до генерації. Далі проводиться вибір найкращого шляху на основі найменших втрат.

Крок 6. Розрахунок та збір статистики. Рахується кількість трансформаторів, для яких було знайдено шлях та для яких шлях не знайдено. Підраховуються загальні втрати системи та загальне навантаження. Проводиться підрахунок повної потужності генераторів системи, що залишилися в робочому стані.

Крок 7. Виведення статистики. Для кожного сценарію виводяться дані: кількість знайдених шляхів, кількість випадків без шляху, загальна кількість оброблених трансформаторів, повне навантаження, повна потужність генераторів.

Крок 8. Завершення програми. Проводиться виведення результатів у файл та завершення роботи програми.

5. Результати дослідження

Імітаційна модель електроенергетичної структури складається з 385 вершин, включаючи 29 об'єктів генерації, 9 електричних підстанцій напругою 750 кВ, 3 електричних підстанцій напругою 500 кВ, 1 електрична підстанція напругою 400 кВ, 89 електричних підстанцій напругою 330 кВ, 35 електричних підстанцій напругою 220 кВ, 219 електричних підстанцій (споживачі) напругою 150 кВ та 110 кВ, та з 626 ребр (ліній електропередачі).

Електрична потужність, яка генерується складає 44514,7 МВт.

Для створеної імітаційної моделі електроенергетичної структури проводилися 100, 200 та 300 ітерацій, що імітують випадкові та заплановані збурення різних елементів моделі, а саме:

- імітація виходу з ладу будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі);
- імітація виходу з ладу будь-якого об'єкту моделі, крім генерації;
- імітація виходу з ладу тільки ліній електропередачі;

- імітація виходу з ладу тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів;
- імітація виходу з ладу тільки трансформаторів електричних підстанцій;
- імітація виходу з ладу тільки трансформаторів споживачів.

Результати моделювання аналізу працездатності електроенергетичної системи при випадкових та запланованих збуреннях наведені на рисунках 1-3 у вигляді гістограм, які показують кількість електроенергії, що можливо передати від генерації до споживача та кількість можливих випадків передачі електроенергії при різних імітаціях виходу з ладу елементів.



а)



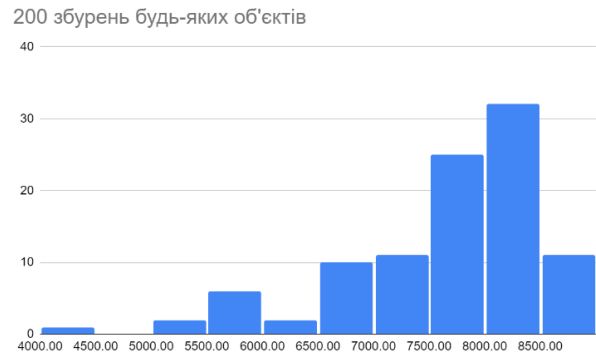
б)



в)



г)



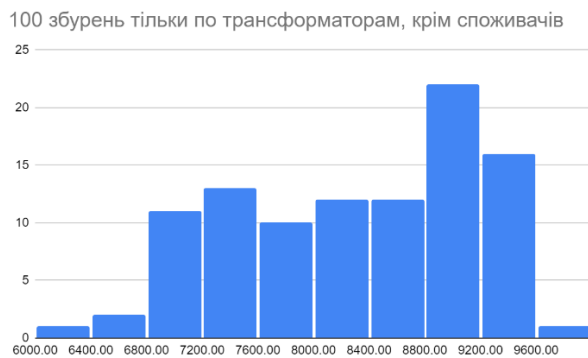
а)



д)



б)

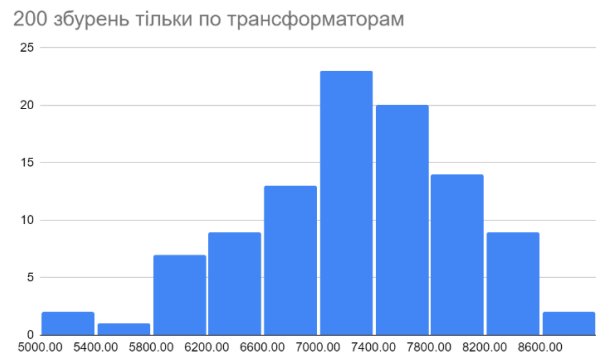


е)

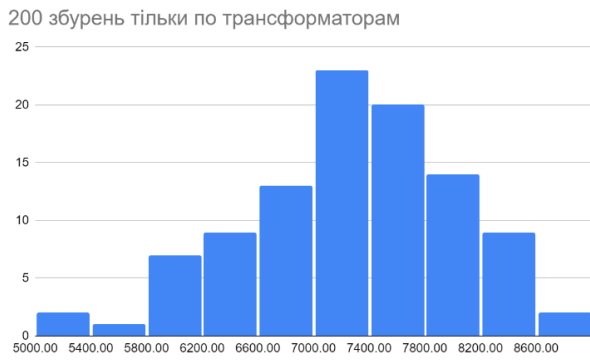


в)

Рис. 1. Результати аналізу працездатності при нанесенні 100 випадкових та запланованих збурень: а) будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі); б) будь-якого об'єкту моделі, крім генерації; в) тільки ліній електропередачі; г) тільки трансформаторів споживачів; д) тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів; е) тільки трансформаторів електричних підстанцій.



г)



д)



б)



е)



в)

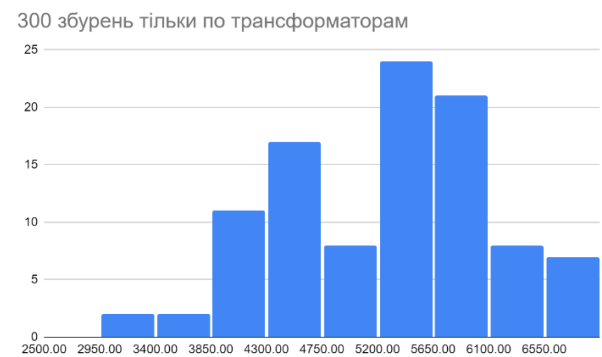
Рис. 2. Результати аналізу працездатності при нанесенні 200 випадкових та запланованих збурень: а) будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі); б) будь-якого об'єкту моделі, крім генерації; в) тільки ліній електропередачі; г) тільки трансформаторів споживачів; д) тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів; е) тільки трансформаторів електричних підстанцій.



г)



а)



д)

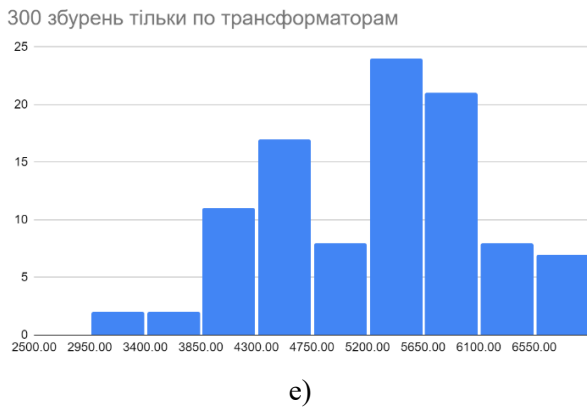


Рис. 3. Результати аналізу працездатності при нанесенні 300 випадкових та запланованих збурень: а) будь-якого об'єкту моделі (генерація, електричні підстанції, споживачі); б) будь-якого об'єкту моделі, крім генерації; в) тільки ліній електропередачі; г) тільки трансформаторів споживачів; д) тільки трансформаторів електричних підстанцій та споживачів; е) тільки трансформаторів електричних підстанцій.

З аналізу гістограм видно, що несвоєчасний час проведення ремонтних робіт або невчасне застосування резервного забезпечення при збільшенні кількості непроектованих збурень призводить до різкого зменшення обсягу електроенергії, який надходить до споживачів. Це вказує на погіршення працездатності всієї електроенергетичної системи, оскільки зниження обсягу електроенергії може призвести до перебоїв у постачанні електроенергії для споживачів, а також до подальших негативних наслідків для ефективності та стабільності роботи системи в цілому.

6. Висновки

1. Ярусний граф може бути легко інтегрований з сучасними технологіями для забезпечення інтелектуального управління енергетичною системою. Це включає в себе системи моніторингу, аналізу даних та автоматизацію. Гнучка структура ярусного графу може допомогти уникнути втрат енергії, оскільки вона дозволяє розміщувати виробничі установки ближче до споживачів, зменшуючи транспортні втрати. Алгоритм зчитування даних для побудови імітаційної моделі забезпечує детальне зчитування та обробку даних із файлів, включаючи всі необхідні перетворення та конвертації для створення структурованого внутрішнього представлення енергетичної системи. Він готує дані для подальших аналізів та обчислень у межах програми. Впровадження інформаційної моделі електроенергетичної стру-

ктури сприяє більш точному прогнозуванню та управлінню енергетичними ресурсами, підвищенню надійності системи та виявленню можливостей для покращень. Такий підхід дозволяє енергетичним компаніям та урядовим органам ефективно реагувати на зміни та забезпечувати стійкість електроенергетичної системи у різних умовах.

2. Метод аналізу працездатності електроенергетичної структури є важливим інструментом для забезпечення надійності та ефективності функціонування енергетичних систем у різних умовах. Цей метод дозволяє не лише оцінити стан системи в реальному часі, але й прогнозувати її роботу в майбутньому, враховуючи потенційні виходи з ладу окремих компонентів. Використання статистичного підходу у аналізі дає можливість об'єктивно оцінити ризики та ідентифікувати критичні елементи системи, які можуть впливати на її стабільність та надійність. З цим розумінням фахівці можуть розробляти ефективні стратегії управління, спрямовані на запобігання можливих випадків відмов та забезпечення безперервного і найбільш оптимального постачання електроенергії для великого кола споживачів. Такий підхід до аналізу працездатності електроенергетичних систем відіграє критичну роль у забезпеченні стійкості та розвитку енергетичного сектору в цілому, сприяючи його адаптації до постійних змін і викликів сучасного світу.

Список використаної літератури

1. Nadia S. Ouedraogo (2017). Africa energy future: Alternative scenarios and their implications for sustainable development strategies. *Energy Policy*. № 106, 457-471. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.021>.
2. Yassin Yehia Rady, Matteo V. Rocco, M.A. Serag-Eldin, Emanuela Colombo (2018). Modelling for power generation sector in Developing Countries: Case of Egypt. *Energy*. № 165, 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.089>.
3. Sayyad Nojavan, Mehdi Mehdinejad, Kazem Zare, Behnam Mohammadi-Ivatloo (2015). Energy procurement management for electricity retailer using new hybrid approach based on combined BICA-BPSO. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 73, 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.033>.
4. Daiji Iwasa, Rikiya Abe, Triet Nguyen-Van (2023). On improvement of system reliability by multiplexing power supply network and its economic impact. *Energy Reports*. № 9, 5857-5862. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.031>.

5. Sayyad Nojavan, Kazem Zare, Behnam Mohammadi-Ivatloo (2017). Selling price determination by electricity retailer in the smart grid under demand side management in the presence of the electrolyser and fuel cell as hydrogen storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*. № 42, 3294-3308.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.070>.
6. Hasan Mehrjerdi, Reza Hemmati (2020). Energy and uncertainty management through domestic demand response in the residential building. *Energy*. № 192.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116647>.
7. Mohammad Sadegh Javadi, Matthew Gough, Seyed Amir Mansouri, Amir Ahmarinejad, Emad Nematbakhsh, Sergio F. Santos, João P.S. Catalão (2022). A two-stage joint operation and planning model for sizing and siting of electrical energy storage devices considering demand response programs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 138.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107912>.
8. Surender Reddy Salkuti (2019). Day-ahead thermal and renewable power generation scheduling considering uncertainty. *Renewable Energy*. № 131, 956-965.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.106>.
9. A. Rezaee Jordehi, V. Sohrabi Tabar, S.A. Mansouri, M. Nasir, S.M. Hakimi, S. Pirouzi (2022). A risk-averse two-stage stochastic model for planning retailers including self-generation and storage system. *Journal of Energy Storage*. № 51.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104380>.
10. Sayyad Nojavan, Kazem Zare (2018). Optimal energy pricing for consumers by electricity retailer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 102, 401-412.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.05.013>.
11. Mahsa Yadegari, Hadi Sahebi, Sobhan Razm, Jalal Ashayeri (2023). A sustainable multi-objective optimization model for the design of hybrid power supply networks under uncertainty. *Renewable Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119443>.
12. Fengzhang Luo, Jiaying Xu, Tianyu Zhang (2021). Quantitative evaluation of power supply reliability improvement in distribution network by customer-side integrated energy system. *Energy Reports*. № 7, 233-241.
13. Jinming Jiang, Weijun Gao, Xindong Wei, Yanxue Li, Soichiro Kuroki (2019). Reliability and cost analysis of the redundant design of a combined cooling, heating and power (CCHP) system. *Energy Conversion and Management*. № 199.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111988>.
14. Jun Xiao, Xin Li, Wenzhuo Gu, Fangxing Li, Chengshan Wang (2015). Model of distribution system total supply capability considering feeder and substation transformer contingencies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 65, 419-424.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.025>.
15. Jun Xiao, Shisong Liu, Zhensheng Li, Fangxing Li (2016). Loadability formulation and calculation for interconnected distribution systems considering N-1 security. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 77, 70-76.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.001>.
16. M.M. Aman, G.B. Jasmon, A.H.A. Bakar, H. Mokhlis (2014). Optimum network reconfiguration based on maximization of system loadability using continuation power flow theorem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 54, 123-133.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.026>.
17. Jun Xiao, Xiqiao Lin, Heng Jiao, Chenhui Song, Huan Zhou, Guoqiang Zu, Chunli Zhou, Dan Wang (2023). Model, calculation, and application of available supply capability for distribution systems. *Applied Energy*. № 348.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121489>.
18. Salwan Tadjour, Shyam Singh Chandel (2023). A comprehensive review on sustainable energy management systems for optimal operation of future-generation of solar microgrids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. № 58.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103377>.
19. Magdi A. Mosa, A.A. Ali (2021). Energy management system of low voltage dc microgrid using mixed-integer nonlinear programming and a global optimization technique. *Electric Power Systems Research*. № 192.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106971>.
20. Muhammad Waseem Khan, Jie Wang, Meiling Ma, Linyun Xiong, Penghan Li, Fei Wu (2019). Optimal energy management and control aspects of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustainable Cities and Society*. № 44, 855-870.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.009>.
21. Sima Davarzani, Ramon Granell, Gareth A. Taylor, Ioana Pisica (2019). Implementation of a novel multi-agent system for demand response management in low-voltage distribution networks. *Applied Energy*. № 253.
22. Sambeet Mishra, Chiara Bordin, Asgeir Tomasgard, Ivo Palu (2019). A multi-agent system approach for optimal microgrid expansion planning under uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 109, 696-709.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.044>.

23. M. Mollayousefi Zadeh, P. MohammadAli Rezayi, S. Ghafouri, M.H. Alizadeh, G.B. Gharehpetian (2023). IoT-based stochastic EMS using multi-agent system for coordination of grid-connected multi-microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 151. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109191>.

24. Abhilash Kantamneni, Laura E. Brown, Gordon Parker, Wayne W. Weaver (2015). Survey of multi-agent systems for microgrid control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. № 45, 192-203. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.07.005>.

25. Joelle Klaimi, Rana Rahim-Amoud, Leila Merghem-Boulahia, Akil Jrad (2018). A novel loss-based energy management approach for smart grids using multi-agent systems and intelligent storage systems. *Sustainable Cities and Society*. № 39, 344-357. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.038>.

26. Dawit Habtu Gebremeskel, Erik O. Ahlgren, Getachew Bekele Beyene (2023). Long-term electricity supply modelling in the context of developing countries: The OSeMOSYS-LEAP soft-linking approach for Ethiopia. *Energy Strategy Reviews*. № 45. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101045>.

27. Asma Dhakouani, Francesco Gardumi, Essia Znouda, Chiheb Bouden, Mark Howells (2017). Long-term optimisation model of the Tunisian power system. *Energy*. № 141, 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.093>.

28. Peter McCallum, David P. Jenkins, Andrew D. Peacock, Sandhya Patidar, Merlinda Andoni, David Flynn, Valentin Robu (2019). A multi-sectoral approach to modelling community energy demand of the built environment. *Energy Policy*. № 132, 865-875. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.041>.

29. Md Alam Hossain Mondal, Claudia Ringler (2020). Long-term optimization of regional power sector development: Potential for cooperation in the Eastern Nile region. *Energy*. № 201, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117703>.

References

1. Nadia S. Ouedraogo (2017). Africa energy future: Alternative scenarios and their implications for sustainable development strategies. *Energy Policy*. № 106, 457-471. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.021>.

2. Yassin Yehia Rady, Matteo V. Rocco, M.A. Serag-Eldin, Emanuela Colombo (2018). Modelling for power generation sector in Developing Countries: Case of Egypt. *Energy*. № 165, 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.089>.

3. Sayyad Nojavan, Mehdi Mehdinejad, Kazem Zare, Behnam Mohammadi-Ivatloo (2015). Energy procurement management for electricity retailer using new hybrid approach based on combined BICA-BPSO. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 73, 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.033>.

4. Daiji Iwasa, Rikiya Abe, Triet Nguyen-Van (2023). On improvement of system reliability by multiplexing power supply network and its economic impact. *Energy Reports*. № 9, 5857-5862. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.031>.

5. Sayyad Nojavan, Kazem Zare, Behnam Mohammadi-Ivatloo (2017). Selling price determination by electricity retailer in the smart grid under demand side management in the presence of the electrolyser and fuel cell as hydrogen storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*. № 42, 3294-3308. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.070>.

6. Hasan Mehrjerdi, Reza Hemmati (2020). Energy and uncertainty management through domestic demand response in the residential building. *Energy*. № 192. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116647>.

7. Mohammad Sadegh Javadi, Matthew Gough, Seyed Amir Mansouri, Amir Ahmarinejad, Emad Nematbakhsh, Sergio F. Santos, João P.S. Catalão (2022). A two-stage joint operation and planning model for sizing and siting of electrical energy storage devices considering demand response programs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 138. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107912>.

8. Surender Reddy Salkuti (2019). Day-ahead thermal and renewable power generation scheduling considering uncertainty. *Renewable Energy*. № 131, 956-965. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.106>.

9. A. Rezaee Jordehi, V. Sohrabi Tabar, S.A. Mansouri, M. Nasir, S.M. Hakimi, S. Pirouzi (2022). A risk-averse two-stage stochastic model for planning retailers including self-generation and storage system. *Journal of Energy Storage*. № 51. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104380>.

10. Sayyad Nojavan, Kazem Zare (2018). Optimal energy pricing for consumers by electricity retailer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 102, 401-412. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.05.013>.

11. Mahsa Yadegari, Hadi Sahebi, Sobhan Razm, Jalal Ashayeri (2023). A sustainable multi-objective optimization model for the design of hybrid power supply networks under uncertainty. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119443>.

12. Fengzhang Luo, Jiaying Xu, Tianyu Zhang (2021). Quantitative evaluation of power supply reliability improvement in distribution network by customer-side integrated energy system. *Energy Reports*. № 7, 233-241.
13. Jinming Jiang, Weijun Gao, Xindong Wei, Yanxue Li, Soichiro Kuroki (2019). Reliability and cost analysis of the redundant design of a combined cooling, heating and power (CCHP) system. *Energy Conversion and Management*. № 199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111988>.
14. Jun Xiao, Xin Li, Wenzhuo Gu, Fangxing Li, Chengshan Wang (2015). Model of distribution system total supply capability considering feeder and substation transformer contingencies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 65, 419-424. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.025>.
15. Jun Xiao, Shisong Liu, Zhensheng Li, Fangxing Li (2016). Loadability formulation and calculation for interconnected distribution systems considering N-1 security. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 77, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.001>.
16. M.M. Aman, G.B. Jasmon, A.H.A. Bakar, H. Mokhlis (2014). Optimum network reconfiguration based on maximization of system loadability using continuation power flow theorem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 54, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.026>.
17. Jun Xiao, Xiqiao Lin, Heng Jiao, Chenhui Song, Huan Zhou, Guoqiang Zu, Chunli Zhou, Dan Wang (2023). Model, calculation, and application of available supply capability for distribution systems. *Applied Energy*. № 348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121489>.
18. Salwan Tajjour, Shyam Singh Chandel (2023). A comprehensive review on sustainable energy management systems for optimal operation of future-generation of solar microgrids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. № 58. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103377>.
19. Magdi A. Mosa, A.A. Ali (2021). Energy management system of low voltage dc microgrid using mixed-integer nonlinear programming and a global optimization technique. *Electric Power Systems Research*. № 192. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106971>.
20. Muhammad Waseem Khan, Jie Wang, Meiling Ma, Linyun Xiong, Penghan Li, Fei Wu (2019). Optimal energy management and control aspects of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustainable Cities and Society*. № 44, 855-870. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.009>.
21. Sima Davarzani, Ramon Granell, Gareth A. Taylor, Ioana Pisica (2019). Implementation of a novel multi-agent system for demand response management in low-voltage distribution networks. *Applied Energy*. № 253.
22. Sambeet Mishra, Chiara Bordin, Asgeir Tomasgard, Ivo Palu (2019). A multi-agent system approach for optimal microgrid expansion planning under uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 109, 696-709. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.044>.
23. M. Mollayousefi Zadeh, P. MohammadAli Rezayi, S. Ghafouri, M.H. Alizadeh, G.B. Gharehpetian (2023). IoT-based stochastic EMS using multi-agent system for coordination of grid-connected multi-microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. № 151. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109191>.
24. Abhilash Kantamneni, Laura E. Brown, Gordon Parker, Wayne W. Weaver (2015). Survey of multi-agent systems for microgrid control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. № 45, 192-203. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.07.005>.
25. Joelle Klaimi, Rana Rahim-Amoud, Leila Merghem-Boulaiah, Akil Jrad (2018). A novel loss-based energy management approach for smart grids using multi-agent systems and intelligent storage systems. *Sustainable Cities and Society*. № 39, 344-357. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.038>.
26. Dawit Habtu Gebremeskel, Erik O. Ahlgren, Getachew Bekele Beyene (2023). Long-term electricity supply modelling in the context of developing countries: The OSeMOSYS-LEAP soft-linking approach for Ethiopia. *Energy Strategy Reviews*. № 45. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101045>.
27. Asma Dhakouani, Francesco Gardumi, Essia Znouda, Chiheb Bouden, Mark Howells (2017). Long-term optimisation model of the Tunisian power system. *Energy*. № 141, 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.093>.
28. Peter McCallum, David P. Jenkins, Andrew D. Peacock, Sandhya Patidar, Merlinda Andoni, David Flynn, Valentin Robu (2019). A multi-sectoral approach to modelling community energy demand of the built environment. *Energy Policy*. № 132, 865-875. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.041>.
29. Md Alam Hossain Mondal, Claudia Ringler (2020). Long-term optimization of regional power sector development: Potential for cooperation in the Eastern Nile region. *Energy*. № 201, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117703>.

MODEL AND METHOD FOR ANALYZING THE OPERABILITY OF THE COUNTRY'S ELECTRIC POWER SYSTEM UNDER NON-PROJECTED DISTURBANCES

M. V. Maksymov¹, V. I. Kryvda², V. O. Suvorov²

¹ Scientific research center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium" of the Institute of the Naval Forces,

² Odessa Polytechnic National University

Abstract. Information and simulation models are important tools in the modern world for analyzing, designing, and optimizing various systems. One effective approach to their construction is the use of graph theory. In this article, we will examine the fundamental principles of constructing an information model using graphs and the method for analyzing the operability of this model under non-projected disturbances.

In amidst increasing demands for reliability in the energy sector, the concept of developing an energy system in the form of a layered graph is becoming increasingly relevant and promising. A layered graph simulation model can provide an effective tool for optimizing energy supply and ensuring the stability and reliability of the system.

Using a layered graph, it is possible to visualize the hierarchy of different energy sources, including renewable sources, traditional fuel types, and energy-efficient technologies. This will facilitate understanding the interaction between various components of the system and allow for the improvement of their integration.

Keywords: electric power system, operability of the electric power system, assessment of the operability of the power supply system, non-project disturbances in the electric power system, generation, transformer substations, electricity consumers.

Отримано 20.02.2024



Максимов Максим Віталійович, НДЦ ЗСУ "Державний океанаріум" Інституту Військово-Морських Сил, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник. Вул. Дідріхсона, 8. Одеса, Україна, 65052
E-mail: prof.maksimov@gmail.com.

Maksym Maksymov, scientific research center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium" of the Institute of the Naval Forces, Doctor of Engineering Sciences, professor, chief researcher of the research department

E-mail: prof.maksimov@gmail.com.

ORCID ID: 0000-0002-7536-2570



Кривда Вікторія Ігорівна, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту. пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: kryvda@op.edu.ua, т. +38-048-705-73-88

Viktoriia Kryvda, Odessa Polytechnic National University, PhD technical, associate professor, associate professor of department of electricity and energy management

E-mail: kryvda@op.edu.ua, t. +38-048-705-73-88

ORCID ID: 0000-0002-0930-1163



Суворов Владислав Олегович, Національний університет «Одеська політехніка», аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: suvorov@op.edu.ua, тел. +38-063-593-94-91

Vladyslav Suvorov, Odessa Polytechnic National University, PhD Student of the Department of Electricity and Energy Management. Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine,

E-mail: suvorov@op.edu.ua, тел. +38-063-593-94-91

ORCID ID: 0000-0003-2842-887X