

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.316:620.92

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри
інженерії енергосистем

_____/Каплун В.В./
(підпис)
« ____ » _____ 2024 р.

_____/Антипов Є.О./
(підпис)
« ____ » _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження засобів локалізації пошкоджень задля підвищення надійності електропостачання споживачів в розподільних мережах, як складової концепції «розумних мереж»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Н.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Бабак В.П.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Кульківський В.Ю.
(ПІБ)

КИЇВ – 2024

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота містить: 71 стор., 4 табл., 2 рис., 6 формул, 22 джерела використаної літератури.

Електричні мережі є критично важливою інфраструктурою для забезпечення стабільного та безперебійного постачання енергії споживачам. Однак, зростаюча складність та розгалуженість розподільних мереж створюють проблеми, пов'язані з ефективною локалізацією пошкоджень, що знижують надійність електропостачання. Концепція "розумних мереж" (smart grids) пропонує інноваційні рішення, зокрема вдосконалені методи виявлення та локалізації пошкоджень, що здатні підвищити ефективність та безпеку енергопостачання.

В свою чергу розподільні мережі, як складові частини енергетичних систем, є найуразливішими до пошкоджень через погодні умови, технічні несправності та людський фактор. Локалізація таких пошкоджень має вирішальне значення для швидкого відновлення електропостачання та зменшення витрат енергії, що дозволяє значно підвищити надійність електропостачання для споживачів. Автоматизація процесу виявлення та усунення неполадок зменшує час простою та сприяє стабільності енергопостачання та знижує витрати на енергетичні ресурси та покращує якість обслуговування споживачів.

Впровадження інтелектуальних систем локалізації пошкоджень у розподільних мережах є важливим кроком до розвитку ефективних "розумних мереж". Застосування таких інноваційних технологій дозволяє забезпечити більш високий рівень надійності електропостачання, знизити ймовірність аварій та підвищити ефективність роботи енергетичних систем загалом. Окрім того, ці технології стають основою для переходу до більш сталої та енергоефективної енергетичної інфраструктури.

Ключові слова: «розумні мережі», релейний захист, розподільні електричні мережі, надійність електропостачання, SCADA-системи, інтелектуальні лічильники, локалізація пошкоджень.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	8
1.1 Концепція «розумних мереж»: визначення та складові	8
1.2 Основні принципи роботи розподільних електричних мереж та огляд проблематики електропостачання і надійності.....	12
1.3 Роль локалізації пошкоджень у підвищенні надійності постачання електроенергії	15
Висновки до розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	23
2.1 Практичні аспекти традиційних методів локалізації пошкоджень.....	23
2.2 Аналіз та оцінка сучасних технологій локалізації пошкоджень	32
2.3 Адаптивні системи моніторингу та діагностики засобів локалізації пошкоджень у концепції «розумних мереж»	38
Висновки до розділу 2	42
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ	44
3.1 Критерії ефективності систем локалізації пошкоджень	44
3.2 Порівняльний аналіз традиційних і сучасних методів	57
3.3 Вплив надійності локалізації на загальну ефективність розподільних мереж.....	61
Висновки до розділу 3	63
ВИСНОВКИ	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ВСТУП

Електричні мережі є невід'ємною складовою частиною енергетичної інфраструктури кожної країни, забезпечуючи передачу електроенергії від джерел виробництва до споживачів. Висока надійність та стабільність функціонування електричних мереж є критично важливими для підтримки соціально-економічної діяльності, ефективної роботи промисловості та забезпечення побутових потреб населення. Однак зростаюча складність і масштабність енергетичних систем, а також виникнення нових викликів, таких як інтеграція відновлювальних джерел енергії, роблять проблему забезпечення надійності постачання електричної енергії особливо актуальною.

Однією з ключових задач, що стоїть перед операторами енергетичних мереж, є оперативне виявлення та локалізація пошкоджень, які можуть виникати через різні фактори, зокрема, технічні несправності, погодні умови, або аварії. Локалізація пошкоджень має важливе значення для забезпечення надійного та безперебійного постачання електроенергії, адже швидке виявлення і ізоляція пошкоджених ділянок зменшує час відключень та дозволяє уникнути масштабних аварій.

З метою підвищення ефективності управління енергосистемами та швидкості локалізації пошкоджень активно впроваджуються новітні технології, зокрема, «розумні мережі» (Smart Grids). Ці технології дозволяють інтегрувати сучасні методи моніторингу та діагностики в реальному часі, автоматизувати процеси управління та забезпечити високу оперативність у реагуванні на аварійні ситуації.

Метою даної магістерської роботи є дослідження теоретичних та практичних аспектів локалізації пошкоджень у електричних мережах, зокрема у контексті впровадження «розумних мереж». Зокрема, основною метою є аналіз існуючих методів та технологій локалізації пошкоджень, оцінка їх ефективності, а також розробка рекомендацій щодо вдосконалення процесів локалізації пошкоджень на основі інтеграції інтелектуальних систем моніторингу та управління.

Особлива увага приділяється вивченню адаптивних систем моніторингу і діагностики в рамках концепції «розумних мереж», які дозволяють оперативно виявляти та ізолювати аварійні ділянки, зменшувати час відключень електроенергії та підвищувати надійність і стабільність енергетичних систем.

Об'єкт дослідження - засоби локалізації пошкоджень в електричних мережах, зокрема в розподільних електричних мережах, як складової концепції «розумних мереж».

Предмет дослідження - методи, технології та інструменти для локалізації пошкоджень в електричних мережах, зокрема їх застосування для підвищення надійності електропостачання споживачів у розподільних електричних мережах в рамках концепції «розумних мереж».

Для досягнення поставленої мети в рамках магістерської роботи передбачається виконати наступні **завдання**:

- дослідити основні поняття та принципи роботи розподільних електричних мереж, зокрема їх взаємозв'язок із концепцією «розумних мереж»;
- визначити складові концепції «розумних мереж» і їх роль у забезпеченні надійності енергопостачання;
- проаналізувати сучасні технології і підходи до локалізації аварій, зокрема методи, що застосовуються в рамках «розумних мереж» ;
- мереж» для підвищення ефективності локалізації пошкоджень;
- порівняти традиційні та сучасні методи локалізації пошкоджень з точки зору їх ефективності, витрат на впровадження та експлуатацію;
- оцінити вплив цих методів на загальну ефективність та надійність розподільних мереж, зокрема на здатність забезпечити безперебійне постачання електроенергії;
- запропонувати практичні рекомендації щодо впровадження та оптимізації методів локалізації пошкоджень з урахуванням специфіки національних енергетичних систем.

Ці завдання дозволять не лише здійснити глибоке дослідження технологій локалізації пошкоджень, але й сприяти розробці ефективних рекомендацій для

модернізації енергетичних мереж, що забезпечить підвищення їх надійності та економічної ефективності.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході до вивчення та порівняння традиційних і сучасних методів локалізації пошкоджень у електричних мережах, зокрема в контексті інтеграції «розумних мереж». Вперше на основі аналізу існуючих систем локалізації пошкоджень та сучасних технологій моніторингу запропоновано адаптивні підходи до діагностики та управління мережами, які можуть значно підвищити ефективність і надійність роботи енергетичних мереж в Україні. Крім того, на основі порівняльного аналізу традиційних і новітніх технологій локалізації пошкоджень запропоновано нові критерії для оцінки їх ефективності, що дозволяє покращити управлінські рішення в умовах швидко змінюваного енергетичного ландшафту.

Завдяки використанню інтелектуальних технологій в системах моніторингу та управління локалізацією пошкоджень, робота відкриває нові можливості для підвищення надійності енергосистем та зменшення економічних втрат, що мають місце через аварії і тривалі відключення в енергосистемах.

Актуальність теми роботи зумовлена необхідністю вдосконалення існуючих методів локалізації пошкоджень в умовах інтеграції нових технологій та зростаючих вимог до надійності енергетичних систем. Результати дослідження можуть бути корисними для операторів енергетичних мереж, розробників інноваційних технологій в галузі енергетики, а також для планування і впровадження нових стандартів і нормативів у сфері електропостачання.

Практичне значення одержаних результатів полягає в підвищенні надійності електропостачання завдяки швидшій локалізації пошкоджень і скороченню часу на відновлення електропостачання. Автоматизація процесу локалізації дозволяє зменшити залежність від людського фактору, підвищуючи ефективність роботи персоналу та знижуючи витрати на обслуговування. Точна локалізація пошкоджень також знижує економічні збитки від простоїв та скорочує витрати на ремонтні роботи. Розроблені рішення можуть бути успішно інтегровані в концепцію «розумних мереж», забезпечуючи ефективніше управління енергетичними

системами. Впровадження цих технологій сприяє кращому використанню відновлювальних джерел енергії та розвитку нових технологій, таких як сенсорні мережі та бездротові комунікації, що дозволяє забезпечити більш стабільну та безпечну роботу електричних мереж.

Структура магістерської роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (22 найменувань, з них, 3 Інтернет-сайтів). Повний обсяг роботи становить 71 сторінок, основного тексту – 70 сторінок. Робота містить 4 таблиці та 2 рисунки.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Концепція «розумних мереж»: визначення та складові

Розумні мережі (Smart Grids) — це інтеграція інформаційних технологій (ІТ) та комунікаційних систем в традиційну електричну мережу для забезпечення ефективного управління електричним енергопостачанням, підвищення надійності, зниження витрат енергії, зменшення екологічного навантаження та інтеграції відновлювальних джерел енергії. Розумні мережі є важливим елементом енергетичних систем майбутнього, здатних адаптуватися до змінних умов попиту, забезпечувати гнучке управління енергетичними потоками та інтеграцію нових технологій. Вони використовують сучасні сенсори, автоматизацію, інформаційні системи та технології зберігання енергії для покращення ефективності енергетичних мереж.

Розумні мережі є основою енергетичної інфраструктури майбутнього, оскільки вони дозволяють інтегрувати відновлювані джерела енергії та забезпечувати збереження енергетичних ресурсів за допомогою високих технологій управління [2].

Вони мають здатність здійснювати двосторонній обмін інформацією між постачальниками та споживачами енергії, що дозволяє підвищити рівень контролю та управління над енергетичними потоками, зменшити витрати, а також дозволяє оптимізувати споживання енергії на рівні користувача. В основі концепції лежить інтеграція відновлювальних джерел енергії, а також автоматичне та дистанційне управління енергетичними процесами.

Метою «розумних мереж» є підвищення ефективності, надійності та стійкості енергетичних систем через автоматизацію, інтеграцію відновлювальних джерел енергії, управління попитом, оптимізацію споживання та забезпечення двостороннього зв'язку між споживачами та постачальниками енергії.

Основними характеристиками розумних мереж є:

- двостороння комунікація - здатність не тільки отримувати дані від користувачів і приладів, але й надсилати інформацію назад для коригування роботи системи;

- інтелектуальне управління, що полягає у використанні алгоритмів та штучного інтелекту для оптимізації роботи мережі;

- автоматизація та моніторинг - постійний моніторинг стану мережі та автоматичне коригування її роботи для запобігання збоїв або аварій;

- гнучкість та адаптивність - здатність системи адаптуватися до змін умов, наприклад, до зростання попиту або зміни пропозиції з боку відновлюваних джерел енергії.

Розумні мережі складаються з кількох ключових елементів, які взаємодіють між собою для забезпечення оптимальної роботи енергетичної системи:

1) Інфраструктура збору даних

Для ефективного управління мережами потрібно збирати величезні обсяги даних з різних джерел: датчики на трансформаторах, лічильники електроенергії, пристрої автоматизації та інші пристрої Інтернету речей (IoT). Ці дані використовуються для моніторингу стану мережі, прогнозування навантажень, а також для підтримки рішень щодо коригування операційних параметрів.

2) Прилади та сенсори

Однією з головних складових є високоточні сенсори та інтелектуальні лічильники, які дозволяють не тільки фіксувати споживану енергію, але й збирати дані про стан електричних ліній, виявляти пошкодження та навіть прогнозувати їх. Інтелектуальні лічильники дають змогу знизити витрати на обслуговування та збори даних, а також забезпечують прозорість для кінцевих споживачів.

3) Інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ)

Для ефективного обміну даними в реальному часі між різними елементами мережі використовуються технології телекомунікацій, програмне забезпечення для моніторингу та управління, а також спеціалізовані

платформи для аналізу та обробки даних. ІКТ забезпечують зв'язок між енергетичними компаніями та споживачами, а також здійснюють моніторинг стану мережі.

4) Інтелектуальні системи управління (SCADA, DMS)
В системах SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) здійснюється централізований моніторинг та контроль мережі. Системи управління диспетчеризацією (DMS) дозволяють оптимізувати розподіл енергії, враховуючи змінні параметри попиту та пропозиції, зокрема у випадку, коли відновлювальні джерела енергії (сонце, вітер) змінюються залежно від погодних умов.

5) Автоматизовані та адаптивні компоненти
Розумні мережі використовують автоматизацію для швидкого реагування на зміни в мережі. Наприклад, якщо система виявляє перевантаження в окремому сегменті, автоматичні системи можуть перенаправити потік енергії або сповіщати диспетчера для втручання. Застосування алгоритмів оптимізації дозволяє адаптувати мережу до постійно змінюваних умов попиту та пропозиції.

6) Зберігання енергії та інтеграція відновлювальних джерел
Одна з основних складових розумних мереж — це здатність інтегрувати в себе різні відновлювальні джерела енергії, такі як сонячні та вітрові електростанції. Для ефективного управління такими джерелами енергії розумні мережі також повинні включати технології зберігання енергії (наприклад, акумулятори) для балансування коливань у виробництві та споживанні електроенергії.

7) Управління попитом
Управління попитом (Demand Response) є важливою складовою розумних мереж. Це технології, які дозволяють змінювати споживання електроенергії споживачами в реальному часі. Це може включати автоматичне вимкнення або зниження потужності енергоспоживаючих пристроїв під час пікових

навантажень або на основі тарифної політики, щоб знизити навантаження на мережу.

8) Кібербезпека та захист даних

Оскільки розумні мережі залежатимуть від постійного потоку даних і з'єднань між різними пристроями, питання кібербезпеки є критично важливим. Для забезпечення захисту від зовнішніх атак і втручань використовуються спеціалізовані технології шифрування, аутентифікації та виявлення аномалій.

Переваги:

- підвищення ефективності, за допомогою аналізу даних і автоматизації процесів можна зменшити втрати енергії та оптимізувати використання ресурсів;
- надійність та стійкість, можливість швидко виявляти та усувати проблеми в мережі, що знижує ймовірність перебоїв у постачанні електроенергії;
- інтеграція відновлювальних джерел енергії, легке підключення та інтеграція сонячних і вітрових станцій, що дозволяє знизити викиди CO₂;
- економія для споживачів, через управління попитом споживачі можуть знизити свої рахунки за електроенергію, особливо за рахунок змінних тарифів.

Виклики:

- інвестиції у інфраструктуру - встановлення необхідних технологій та оновлення мереж потребує значних капіталовкладень;
- кібербезпека, зростає кількість атак на енергетичні системи, що вимагає постійного вдосконалення методів захисту;
- регулювання і стандартизація, необхідність розробки універсальних стандартів для сумісності різних елементів системи.

Одним із основних завдань для України є створення ефективної інфраструктури для розумних мереж, яка зможе забезпечити високий рівень енергоефективності та скоротити втрати енергії при передачі [5].

Використання смарт грід дозволяє забезпечити не лише ефективне керування електропостачанням, але й інтеграцію із джерелами відновлювальної енергії, що є важливим для зменшення викидів вуглекислого газу [10].

Концепція «розумних мереж» є важливим кроком до сталого та ефективного управління енергетичними системами. Завдяки інтеграції сучасних ІКТ, автоматизації та інтелектуальному управлінню, розумні мережі дозволяють знизити витрати енергії, підвищити надійність постачання та інтегрувати відновлювальні джерела енергії. Проте для реалізації цієї концепції необхідно подолати ряд технічних, економічних та регуляторних викликів.

1.2 Основні принципи роботи розподільних електричних мереж та огляд проблематики електропостачання і надійності

Розподільні електричні мережі є важливою складовою сучасної енергетичної інфраструктури, що забезпечує надійність постачання електроенергії та гнучкість у її розподілі. Основним принципом таких мереж є їх модульність і сегментація, що дозволяє знижувати ризики аварійних ситуацій та їх негативні наслідки.

Модульність — це принцип, який передбачає розподіл мережі на відокремлені ділянки, кожна з яких може працювати незалежно від інших. Це забезпечує більшу стійкість до збоїв, оскільки пошкодження або аварія в одній частині мережі не впливають на роботу інших її сегментів. Наприклад, якщо на одній підстанції або в одній лінії передачі виникає аварія, це не призводить до відключення інших ділянок мережі, а значить, споживачі, які підключені до інших частин мережі, продовжують отримувати енергію. Таке резервування особливо важливе в умовах великих та складних енергетичних систем, де одночасно можуть виникати численні несправності. Окрім того, модульна організація дозволяє значно спростити обслуговування та ремонти, оскільки відключати можна лише окремі ділянки, не порушуючи загальної роботи системи. Розподільні мережі організуються таким чином, що кожна ділянка може

функціонувати незалежно. Вони мають свою підстанцію, розподільчі лінії та захисні механізми, що дозволяють ізолювати пошкоджену частину системи.

Забезпечення резервування та автоматичне переключення, сучасні розподільні мережі зазвичай передбачають наявність резервних ліній та автоматичних пристроїв перемикачів, які дають змогу швидко перенаправляти електричні потоки в разі аварійних ситуацій. Таке автоматичне перемикачів забезпечує мінімальні перебої у подачі енергії. Наприклад, якщо лінія електропередачі виходить з ладу, автоматичні системи можуть переключити споживачів на іншу лінію або підстанцію без втручання людини. Це дозволяє знизити час відновлення нормального функціонування мережі, що є критично важливим для забезпечення стабільного постачання електроенергії у разі надзвичайних ситуацій. Таке резервування та перемикачів особливо важливе в умовах, коли мережа обслуговує великі території з численними споживачами. Однією з важливих особливостей розподільних мереж є використання резервних ліній та автоматичних систем перемикачів, які дозволяють оперативно перенаправляти потоки енергії в разі відключення або пошкодження одного з елементів.

Інтелектуальні системи управління, для ефективного управління та моніторингу розподільних мереж використовуються інтелектуальні системи управління, найпоширенішою з яких є SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA-системи дозволяють здійснювати реальний моніторинг усіх елементів мережі, включаючи підстанції, лінії електропередачі та інші критичні об'єкти. Система надає операторам можливість дистанційно керувати роботою мережі, змінювати налаштування, виявляти та локалізувати проблеми в мережі, а також вживати заходів для уникнення або мінімізації наслідків аварій. Одним з основних переваг SCADA є здатність у реальному часі отримувати дані про стан мережі, що дозволяє оператору швидко реагувати на зміни в системі і ефективно керувати енергетичними потоками. Системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) є важливою складовою розподільних мереж, що дає змогу в реальному часі моніторити роботу елементів мережі та оперативно реагувати на зміни в її стані.

Динамічне управління навантаженням - однією з основних задач розподільних мереж є управління навантаженням. У розподільних мережах цей процес здебільшого автоматизований і передбачає можливість перенаправлення енергії в залежності від змін в попиті або виникнення перегрузок в одних зонах мережі. Технології динамічного управління навантаженням дозволяють збалансувати попит та пропозицію енергії, забезпечуючи оптимальну роботу всієї системи. У разі необхідності енергія може бути перенаправлена в менш навантажені ділянки мережі, щоб уникнути перевантажень. Це також включає в себе інтеграцію технологій управління попитом, коли споживачі можуть тимчасово зменшити своє споживання або переключитися на альтернативні джерела енергії у пікові періоди. В умовах великих енергетичних систем це допомагає значно знизити ймовірність аварій.

Інтеграція відновлювальних джерел енергії - розподільні мережі дозволяють інтегрувати відновлювальні джерела енергії, такі як сонячні та вітрові установки, що є важливим кроком до досягнення більшої енергетичної стійкості та зменшення залежності від традиційних джерел енергії. Оскільки ці джерела часто є непостійними і залежать від погодних умов, розподілені мережі дозволяють більш ефективно керувати енергетичними потоками, компенсуючи коливання виробництва енергії від відновлювальних джерел іншими, більш стабільними джерелами. Для цього використовуються технології зберігання енергії, які дозволяють акумулювати енергію у періоди надлишку і використовувати її у моменти, коли генерація з відновлювальних джерел зменшується.

Гнучкість та адаптивність - розподільні мережі відрізняються високим рівнем гнучкості і здатністю адаптуватися до змін у попиті та пропозиції електричної енергії. Це означає, що мережа може швидко змінювати режим роботи в залежності від зовнішніх обставин, таких як зміни у навантаженні, погодні умови чи рівень виробництва відновлювальних джерел енергії. У таких мережах можна швидко запроваджувати нові технології та методи управління, що забезпечує більш ефективне використання енергетичних ресурсів

Проблеми електропостачання і надійності є важливими аспектами енергетичної безпеки та стабільності. Перебої в постачанні електричної енергії, перевантаження системи, а також інтеграція відновлювальних джерел енергії створюють виклики для надійної роботи мереж.

Перебої в електропостачанні, часто виникають через несправності в обладнанні або природні катаклізми.

Перевантаження та нестабільність - є однією з основних причин збоїв у постачанні енергії. «Перевантаження трансформаторів і ліній передачі може призводити до падіння напруги та навіть до виходу з ладу обладнання», — зазначає. Для запобігання перевантаження необхідно використовувати технології зберігання енергії та вдосконалення систем управління навантаженням.

Інтеграція відновлювальних джерел енергії, такі як сонячні панелі та вітрові турбіни, все більше інтегруються в енергетичні системи. Однак ці джерела є нестабільними через залежність від погодних умов, що створює певні труднощі для підтримки стабільності мереж.

Кібербезпека - оскільки енергетичні мережі стають все більше залежними від інформаційних технологій, питання кібербезпеки набуває критичного значення. Атаки на енергетичні системи можуть призвести до серйозних збоїв у їх роботі.

Економічні та технічні витрати - модернізація та підтримка надійних електричних мереж вимагають значних фінансових витрат. Розвиток розподільних мереж та їх адаптація до нових технологій потребує великих інвестицій у новітнє обладнання та вдосконалення систем.

1.3 Роль локалізації пошкоджень у підвищенні надійності постачання електроенергії

Локалізація пошкоджень є однією з ключових технологій для підвищення надійності електропостачання. Вона передбачає швидке виявлення та ізоляцію аварійних ділянок в електричних мережах, що дозволяє знизити масштаб пошкоджень та мінімізувати вплив на роботу всієї мережі. У контексті

забезпечення стабільності електропостачання локалізація пошкоджень має критичне значення, оскільки вона дозволяє зменшити час відновлення енергопостачання та зберегти безперебійність постачання електроенергії споживачам.

Швидка локалізація пошкоджень дозволяє оперативно визначити межі пошкодженої зони і автоматично відключити її від загальної мережі. Така ізоляція сприяє збереженню працездатності інших частин системи, що дозволяє уникнути масштабних відключень. Наприклад, у випадку короткого замикання в одній з ліній передачі, система може автоматично виявити точку пошкодження та відключити лише пошкоджену ділянку, в той час як решта мережі продовжить функціонувати без перебоїв.

В Україні система виявлення та ізоляції аварійних ділянок електричних мереж на сучасному етапі базується на поєднанні автоматизованих технологій, інтелектуальних систем управління та традиційних методів моніторингу. Важливим елементом є оперативність реагування на аварійні ситуації, що дозволяє мінімізувати збитки від відключень електроенергії, скоротити час на відновлення постачання та забезпечити безперебійне енергопостачання для споживачів.

В Україні основним інструментом для швидкого виявлення аварійних ситуацій в енергетичних мережах є автоматизовані системи управління, зокрема SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Ці системи дають змогу моніторити роботу електричних мереж у реальному часі, виявляти зміни в параметрах (напруга, струм, частота) та оперативно визначати місце пошкодження. Зокрема, в Україні компанії, які займаються розподілом та передачею електроенергії, активно впроваджують елементи SCADA для оперативного реагування на аварії.

Уряд України працює над впровадженням смарт технологій в енергетичному секторі для забезпечення сталого розвитку і підвищення ефективності енергоспоживання [21].

Наприклад, "Укренерго" (Національна енергетична компанія) має в своєму розпорядженні інтегровану систему моніторингу, що дозволяє в реальному часі

контролювати роботу високовольтних ліній і підстанцій по всій країні. Коли виникає аварія, система автоматично передає інформацію до диспетчерських пунктів, що дозволяє швидко локалізувати пошкодження та ізолювати його.

Нещодавно в Україні розпочато впровадження елементів "розумних мереж" (Smart Grids), які мають на меті значно підвищити ефективність виявлення та ізоляції аварій. Інтелектуальні мережі дозволяють не лише виявляти аварії, але й автоматично перемикає лінії, якщо одна з них вийшла з ладу. Це значно зменшує час перебоїв у постачанні електроенергії для споживачів. Розумні лічильники та датчики на різних етапах мережі фіксують будь-які зміни в електричних параметрах і можуть передавати ці дані безпосередньо до центру управління, що забезпечує миттєву реакцію.

Один з прикладів таких ініціатив — проект компанії "Київобленерго", яка впровадила систему "розумних" підстанцій, що автоматично реагують на аварії і можуть перенаправляти потік енергії через резервні лінії.

Велике значення для швидкості виявлення та ізоляції аварійних ділянок в Україні має застосування дистанційного керування енергосистемами. Це означає, що диспетчери можуть оперативно управляти роботою ліній та підстанцій без необхідності фізичного втручання на місці. Дистанційне керування дозволяє швидко вимикати або переключати лінії, що допомагає уникнути широкомасштабних відключень.

ISO 50001:2018 визначає вимоги до системи енергетичного менеджменту, зокрема щодо інтеграції смарт технологій для оптимізації споживання енергії" [20].

В Україні вже є практики застосування дистанційного керування в обленерго (обласні енергетичні компанії). Завдяки цьому вдається знижувати час реагування на аварії та швидше відновлювати постачання енергії в разі порушень.

Незважаючи на розвиток автоматизованих систем, у багатьох випадках швидкість виявлення та ізоляції пошкоджень все ж залежить від погодних умов і характеристик мережі. В Україні енергетичні мережі часто піддаються негативному впливу погодних умов, таких як снігопади, бурі та сильні морози, що

може ускладнювати роботу системи і уповільнювати процес виявлення аварій. У таких випадках локалізація пошкоджень може бути ускладнена через фізичні обмеження, наприклад, обледеніння ліній або пошкодження обладнання під час стихійних лих.

Наприклад, у 2021 році через снігопади та сильні вітри в Україні відбулося значне знеструмлення в кількох областях, і хоча автоматизовані системи виявили більшість пошкоджень, на деяких ділянках мережі виникли додаткові складнощі через блокування доступу до місць аварій або ускладнене відновлення.

В Україні триває модернізація енергетичних мереж, і в найближчі роки можна очікувати суттєвих поліпшень у системах виявлення і локалізації аварій. Планується впровадження новітніх технологій, таких як безпілотні літальні апарати (дрони) для перевірки ліній високої напруги, а також покращення інфраструктури для зменшення впливу погодних факторів на мережі.

До того ж, планується розширення використання "розумних" технологій на всіх етапах енергетичної системи, від генеруючих потужностей до кінцевих споживачів. Це дозволить скоротити час на виявлення та ізоляцію аварійних ділянок, покращити стійкість мережі та знизити ймовірність великих збоїв у постачанні електроенергії.

Швидкість виявлення та ізоляції аварійних ділянок в Україні активно покращується завдяки впровадженню автоматизованих систем, інтелектуальних мереж та дистанційного керування. Це дозволяє зменшити час на реагування на аварії та швидше відновлювати енергопостачання для споживачів. Проте вплив погодних умов і старіння деяких елементів мережі все ще може ускладнювати процес виявлення та ізоляції пошкоджень, що потребує подальших інвестицій у модернізацію інфраструктури.

Сучасні системи автоматизованого управління, такі як SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), дозволяють виявляти пошкодження на ранніх етапах їх виникнення, здійснювати контроль над параметрами мережі в реальному часі і здійснювати автоматичне переключення або ізоляцію пошкоджених ділянок. Важливим елементом таких систем є використання датчиків і лічильників, які

здатні виявляти зміни в електричних параметрах (наприклад, струм, напруга, частота), що свідчать про виникнення аварій.

Такі технології дозволяють автоматично виявляти коротке замикання або інші види аварій, а також приймати рішення щодо перенаправлення потоку енергії на інші ділянки мережі без необхідності втручання оператора.

В Україні процес локалізації пошкоджень в електричних мережах активно автоматизується завдяки впровадженню сучасних технологій моніторингу та управління. Одним із основних інструментів є системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), які дозволяють виявляти аварії в реальному часі та оперативно локалізувати пошкоджені ділянки. Це дозволяє диспетчерам швидко ізолювати пошкоджені лінії та зменшити час відключення для споживачів.

Крім того, впроваджуються "розумні мережі" (Smart Grids), які автоматично виявляють збої, переключують навантаження на резервні лінії і можуть навіть здійснювати перемикання без участі оператора. Інтелектуальні лічильники та датчики, встановлені на різних ділянках мережі, передають дані про аварії безпосередньо до центру управління, що дозволяє швидко реагувати на інциденти.

Однак, незважаючи на досягнення в автоматизації, в Україні ще є деякі проблеми з інфраструктурою, які потребують додаткових інвестицій для забезпечення максимальної ефективності цих технологій.

Локалізація пошкоджень також передбачає використання резервних каналів і ліній, що дозволяють миттєво перенаправляти потоки енергії в разі пошкодження основної лінії. Це забезпечує безперебійність енергопостачання, навіть коли частина мережі виведена з ладу. Такі резерви можуть бути забезпечені за допомогою паралельних ліній передачі, які автоматично вмикаються, якщо основна лінія стає несправною.

Завдяки таким резервуванням мережі можуть забезпечувати стабільне постачання енергії навіть у разі серйозних аварій.

Локалізація пошкоджень також має важливе значення для підвищення стійкості енергетичної системи до природних катастроф, таких як бурі, повені або снігові обвали, які можуть пошкодити значні ділянки електричних мереж. В таких

випадках швидке виявлення і ізоляція пошкоджень дозволяє зберегти працездатність інших частин мережі і уникнути повного відключення енергопостачання на великих територіях.

Чим швидше буде локалізовано пошкодження і відключено пошкоджену частину мережі, тим менші економічні збитки від аварії. Локалізація дозволяє зменшити кількість споживачів, які залишаються без електропостачання, та скоротити час на відновлення енергопостачання. Крім того, це дозволяє скоротити витрати на ремонт і заміну пошкоджених елементів мережі, оскільки мінімізується зона пошкоджень.

Автоматизація локалізації пошкоджень в Україні значно підвищує економічну ефективність енергетичних мереж. Використання систем SCADA та "розумних мереж" дозволяє швидше виявляти та ізолювати аварійні ділянки, що зменшує час перебоїв у постачанні електроенергії, а отже, знижує економічні збитки для споживачів і енергетичних компаній. Оперативне відновлення енергопостачання також дозволяє знижувати витрати на ремонти та обслуговування, оскільки аварії обмежуються локалізованими ділянками мережі, а не охоплюють великі території. Крім того, автоматизація сприяє оптимізації роботи енергетичних систем, що знижує експлуатаційні витрати і підвищує загальну ефективність енергетичної інфраструктури.

Роль локалізації пошкоджень у підвищенні надійності постачання електроенергії є надзвичайно важливою. Швидке виявлення та ізоляція пошкоджених ділянок дозволяють зменшити збої в роботі мережі, забезпечити безперебійне постачання енергії та знизити економічні збитки від аварій. Використання автоматизованих систем управління та резервування дозволяє значно підвищити ефективність мережі та знизити час на відновлення енергопостачання після аварій.

Висновки до розділу 1

Процес автоматизації локалізації пошкоджень в електричних мережах та впровадження новітніх технологій в Україні має значний вплив на покращення

надійності постачання електроенергії, економічну ефективність та стабільність енергосистеми в цілому.

Швидка локалізація пошкоджень в мережі є критично важливою для мінімізації впливу аварій на всю енергетичну систему. Оперативне виявлення та ізоляція пошкоджених ділянок дозволяє обмежити масштаби відключень, що сприяє безперервності електропостачання для споживачів. Використання автоматизованих систем моніторингу, таких як SCADA, дозволяє значно скоротити час реагування та підвищити ефективність відновлення роботи енергосистеми.

Варто відзначити, що в Україні активно впроваджуються автоматизовані системи для локалізації аварійних ситуацій. Зокрема, використання систем SCADA та технологій "розумних мереж" дозволяє оперативно виявляти та ізолювати пошкоджені ділянки мережі, скорочуючи час перебоїв у постачанні електроенергії. Інтелектуальні лічильники та датчики на різних ділянках мережі дозволяють в реальному часі відстежувати стан мережі і миттєво передавати дані до диспетчерських пунктів. Це підвищує ефективність управління енергетичними системами і зменшує ризик масових відключень.

Автоматизація локалізації пошкоджень має значний позитивний вплив на економічну ефективність енергетичних систем. Завдяки швидкому виявленню аварій та ізоляції пошкоджених ділянок знижуються витрати на ремонти та обслуговування. Оперативне відновлення постачання енергії дозволяє зменшити економічні збитки, що виникають через тривалі відключення, та оптимізувати роботу енергетичних компаній. Крім того, автоматизація дозволяє знизити експлуатаційні витрати, зменшити витрати на персонал та покращити планування енергетичних ресурсів.

Попри значні досягнення в автоматизації, в Україні є певні проблеми, пов'язані з застарілою інфраструктурою та впливом погодних умов, що можуть ускладнювати ефективність локалізації пошкоджень. Проте, розвиток "розумних мереж", модернізація обладнання та впровадження новітніх технологій сприятимуть подальшому поліпшенню ситуації. У найближчі роки очікується впровадження більш ефективних систем, таких як використання дронів для

обстеження ліній, що дозволить ще більше підвищити швидкість реагування на аварії.

Загалом, автоматизація процесів локалізації пошкоджень в електричних мережах є важливим кроком для підвищення надійності та економічної ефективності енергосистеми в Україні. Використання сучасних технологій дозволяє не тільки швидше реагувати на аварії, але й значно знижує витрати, пов'язані з ремонтом та відновленням енергопостачання. Перспективи розвитку автоматизації та "розумних мереж" відкривають нові можливості для стабільної роботи енергетичної інфраструктури, зменшуючи залежність від традиційних методів управління та підвищуючи ефективність енергопостачання для кінцевих споживачів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Практичні аспекти традиційних методів локалізації пошкоджень

Локалізація пошкоджень в електричних мережах є ключовим етапом у відновленні нормального функціонування енергосистеми після аварій. Виявлення та ізоляція пошкоджених ділянок дозволяє мінімізувати час відключення енергопостачання і обмежити збитки. Традиційні методи локалізації пошкоджень в електричних мережах були широко використовувані до впровадження сучасних автоматизованих систем та технологій "розумних мереж". Проте вони й досі мають важливе значення в багатьох енергетичних компаніях і є основою для розуміння розвитку новітніх технологій.

Для ефективного виявлення і локалізації пошкоджень в енергетичних системах важливим аспектом є правильне налаштування релейного захисту, яке дозволяє швидко і точно визначити місце пошкодження" [16].

Одним із найпоширеніших традиційних методів є визначення місця пошкодження на основі вимірювання опору ізоляції або використання методів індукції. Ці методи зазвичай застосовуються на високовольтних лініях. У разі пошкодження, коли відбувається замикання, змінюються електричні характеристики в мережі, такі як опір чи індуктивність, що дозволяє виявити зону пошкодження. Важливим етапом є проведення вимірювань на різних ділянках мережі для визначення місця пошкодження.

Традиційні методи локалізації пошкоджень, такі як вимірювання струмів і напруг, дозволяють ефективно визначати місце пошкодження, однак вони вимагають значного часу для збору даних" [8].

Основним принципом традиційних методів локалізації є порівняння нормальних та аварійних параметрів мережі, що дає змогу оперативно визначити зону пошкодження за допомогою відповідних алгоритмів і налаштувань релейного захисту" [13].

У літературі вказано, що такі методи часто застосовуються на коротких лініях або в мережах, де пошкодження виникають через зовнішні фактори, такі як погодні умови або механічні пошкодження. Проте для великих мереж з великою кількістю споживачів такі методи можуть бути недостатньо швидкими та ефективними.

Іншим традиційним методом є локалізація пошкоджень за допомогою вимірювання струму короткого замикання. Цей метод базується на аналізі характеристик струму, що протікає через мережу в момент короткого замикання. Струм короткого замикання має певну амплітуду та форму, які дозволяють зрозуміти, на якій ділянці мережі сталося пошкодження.

Дослідження показують, що цей метод є ефективним для великих електричних мереж, оскільки дозволяє не лише виявити пошкодження, але й визначити його тип (повне або неповне замикання) [7]. Проте він вимагає певних налаштувань та додаткових вимірювальних приладів, що робить процес локалізації більш затратним за часом та ресурсами.

У традиційних електричних мережах для локалізації пошкоджень застосовуються релейні захисти, які автоматично виявляють та ізолюють пошкоджену ділянку. Релейний захист заснований на аналізі параметрів струму та напруги в мережі. При виникненні аварії реле спрацьовують, автоматично відключаючи пошкоджену ділянку від основної мережі.

Такі системи забезпечують відключення при коротких замиканнях, перенавантаженнях або інших типах аварій. Вони можуть бути налаштовані на певні параметри, що дозволяє зменшити час виявлення пошкодження та локалізації проблеми. Водночас релейний захист не завжди може точно вказати місце пошкодження, тому для детальнішого аналізу необхідно застосовувати додаткові методи [17].

Традиційні методи локалізації пошкоджень у енергосистемах за допомогою вольтметрії та амперметрії вимагають великих затрат часу на обробку даних, що впливає на швидкість локалізації" [6]

Метод тріангуляції за допомогою вимірювання часу поширення сигналу, є базовим для локалізації пошкоджень в повітряних лініях електропередачі. Він

передбачає використання сигналів для визначення часу їх поширення між точками, де розміщені датчики. Визначивши різницю в часі, коли сигнал досягає різних точок, можна визначити координати місця пошкодження. Для цього використовують спеціальні пристрої, які дозволяють фіксувати момент проходження сигналу по проводах.

Цей метод є досить точним, але він вимагає розгалуженої мережі датчиків по всій довжині лінії, що обмежує його застосування на великих відстанях [4].

У деяких випадках локалізація пошкоджень здійснюється за допомогою візуального огляду пошкоджених ділянок або використання спеціальних технічних засобів, таких як дрони або вертольоти, для перевірки ліній високовольтних мереж. Візуальний огляд є одним із традиційних способів, який може бути корисним на обмежених ділянках мережі або в разі механічних пошкоджень, викликаних, наприклад, падінням дерев.

Такі методи вимагають участі обслуговуючого персоналу і можуть бути доволі затратними за часом, особливо в умовах великих територій та складних погодних умов [11].

Традиційні методи локалізації пошкоджень у електричних мережах мають значну роль у забезпеченні надійності енергетичних систем, хоча їх застосування має певні обмеження. Вони ефективні на малих відстанях та в умовах коротших ліній, але з ростом масштабів мережі їх точність і оперативність зменшується. Водночас ці методи є важливою основою для розуміння принципів локалізації пошкоджень, на яких будуються сучасні автоматизовані технології в рамках «розумних мереж».

В Україні локалізація пошкоджень в електричних мережах є важливою складовою забезпечення надійності енергопостачання. Враховуючи значний обсяг енергетичної інфраструктури, сучасні методи локалізації пошкоджень поєднують як традиційні технології, так і інноваційні рішення, що активно розвиваються в рамках впровадження «розумних мереж». Розглянемо основні методи локалізації пошкоджень, які застосовуються в Україні, зокрема ті, що використовуються на розподільчих і високовольтних мережах.

Релейний захист є основою для локалізації пошкоджень у багатьох енергетичних мережах України. Ці системи працюють на основі аналізу електричних параметрів, таких як струм та напруга. При виникненні аварії реле спрацьовують і автоматично відключають пошкоджену ділянку мережі. Сучасні інші неполадки, що сприяє швидкій ізоляції аварійної ділянки.

Методи локалізації пошкоджень на основі аналізу сигналів від релейного захисту дозволяють значно зменшити час на виявлення місця пошкодження і зменшити кількість помилкових спрацьовувань [19].

В Україні застосовуються релейні захисти на всіх рівнях енергетичних мереж — від низької напруги до високовольтних ліній. Для кращої локалізації пошкоджень часто використовуються комбіновані захисні реле, які спрацьовують залежно від типу аварії: електричні, механічні чи температурні зміни. Однією з переваг такого підходу є швидке реагування на проблеми в мережі, що дозволяє обмежити масштаби відключень.

В якості дослідження проведемо розрахунок релейного захисту в локалізації пошкоджень розподільних мереж, так як в Україні він є важливою складовою частиною енергетичних систем, оскільки він дозволяє швидко і ефективно локалізувати пошкодження на різних ділянках розподільної мережі, що забезпечує стабільність і надійність електропостачання. У цьому прикладі розглянемо розрахунок релейного захисту для локалізації пошкоджень у розподільних мережах 10 кВ з використанням різних методів захисту.

Маємо наступні вихідні дані:

- Напруга мережі: 10 кВ (висока напруга).
- Номінальна потужність трансформатора: 1000 кВА.
- Тип захисту: струмова релейна захисна система (захист за струмами короткого замикання та перевантаження).
- Довжина кабельної лінії: 2 км.
- Кабель: силовий кабель з номінальним струмом 250 А.
- Коротке замикання: струм короткого замикання на лінії складає 12 кА.
- Клас реле: релейна установка типу 7Т, з характеристиками типу I-II.

Визначимо номінальний струм лінії:

Номінальний струм лінії можна розрахувати за допомогою формули:

$$I_{\text{H}} = \frac{S_{\text{H}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{H}}} \quad (2.1)$$

де

- $S_{\text{H}} = 1000$ кВА— номінальна потужність трансформатора,

- $U_{\text{H}} = 10$ кВ— номінальна напруга.

Розрахунок:

$$I_{\text{H}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10^3} = \frac{1000}{\sqrt{3}} \approx 577,35 \text{ A}$$

Отже, номінальний струм лінії становить 577,35 А.

Розрахуємо параметри релейного захисту:

Для захисту лінії від коротких замикань використовуємо струмове реле. Струм короткого замикання на лінії складає 12 кА. Для налаштування релейного захисту за струмом короткого замикання обираємо множник, який буде визначати поріг спрацьовування реле.

Множник для релейного захисту за струмами короткого замикання $I_{\text{сп}}$ можна вибрати рівним 1,2–1,5 від номінального струму, що дозволить здійснити спрацьовування реле при 1,2–1,5 рази більше від номінального струму лінії.

$$I_{\text{сп}} = 1,3 \cdot I_{\text{H}} = 1,3 \cdot 577,35 \text{ A} \approx 750,56 \text{ A}$$

Тобто, релейний захист спрацьовуватиме, коли струм на лінії перевищить 750,56 А.

Час спрацьовування релейного захисту можна обчислити за допомогою типової характеристики спрацьовування захисту, яка залежить від струму короткого замикання.

Формула для часового параметра t (за струмами короткого замикання):

$$t = \frac{C}{\left(\frac{I_{кз}}{I_H}\right)^2} \quad (2.2)$$

де C — константа, яка для типового реле приймається рівною 10 (для ліній середньої напруги).

Розрахунок часу спрацьовування для струму короткого замикання $I_{кз} = 12$ кА

$$t = \frac{10}{\left(\frac{12}{0,57735}\right)^2} = \frac{10}{20,78^2} \approx 0,0024 \text{ с}$$

Це означає, що при короткому замиканні на лінії час спрацьовування реле становить близько 2,4 мс, що дозволяє швидко відключити пошкоджену ділянку мережі.

Для захисту лінії від перевантаження використовуємо реле перевантаження, яке спрацьовує, коли струм на лінії перевищує допустимі значення протягом певного часу. Для цього вибираємо множник 1,2–1,5 від номінального струму, щоб уникнути спрацьовування реле під час короткочасних пусків обладнання.

$$I_{перев} = 1,3 \cdot I_H = 1,3 \cdot 577,35 \text{ А} \approx 750,55 \text{ А} \quad (2.3)$$

Час спрацьовування реле перевантаження можна визначити за допомогою часо-струмової характеристики, яку задає тип захисту:

(2.4)

$$t_{перев} = \frac{C_{перев}}{\left(\frac{I_{перев}}{I_H}\right)^2}$$

де $C_{перев}$ — константа, яка для реле перевантаження типово становить 30.

Для перевантаження з струмом $I_{перев} = 750,55$ А

$$t_{перев} = \frac{30}{\left(\frac{750,55}{577,35}\right)^2} \approx 25 \text{ годин}$$

Це означає, що захист від перевантаження спрацює, якщо струм на лінії буде триматися на рівні перевантаження протягом 25 годин.

В результаті проведених розрахунків отримали наступні загальні налаштування релейного захисту:

1) Захист від короткого замикання

- Поріг спрацьовування: 750,56 А.

- Час спрацьовування: 2,4 мс (дуже швидке відключення).

2) Захист від перевантаження:

- Поріг спрацьовування: 750,55 А.

- Час спрацьовування: 25 годин.

Тому можемо дійти наступного висновку релейний захист на основі струмів короткого замикання та перевантаження є ефективним для локалізації пошкоджень у розподільних мережах. Швидке відключення пошкоджених ділянок мережі допомагає знизити ризик поширення аварій. Час спрацьовування захисту для короткого замикання (2,4 мс) дозволяє дуже швидко локалізувати пошкодження. Захист від перевантаження (час спрацьовування до 25 годин) дозволяє уникнути помилкових спрацьовувань під час короточасних пусків обладнання, забезпечуючи стабільну роботу мережі.

Завдяки налаштуванню таких захистів можна досягти високої надійності та ефективності роботи розподільних мереж, що є критично важливим для забезпечення безперебійного енергопостачання.

Метод вимірювання струму короткого замикання, є одним із традиційних і широко використовуваних в Україні для локалізації пошкоджень на високовольтних лініях. Вимірювання струму короткого замикання допомагає визначити ділянку, де виникла аварія. У разі короткого замикання струм різко збільшується, і системи вимірювальних пристроїв можуть зафіксувати його величину та напрямок.

В Україні цей метод є досить популярним завдяки своїй простоті та ефективності. Вимірювальні прилади, що встановлюються на різних ділянках мережі, дозволяють швидко отримати інформацію про зміну параметрів і виявити місце аварії. Проте для великих розподільчих мереж точність та швидкість

локалізації можуть бути знижені, тому часто використовуються додаткові методи для більш точного визначення місця пошкодження.

Метод триангуляції за допомогою часових затримок сигналу - використовується для локалізації пошкоджень в повітряних лініях високої напруги та часто застосовується в Україні для моніторингу великих територій. За допомогою технології триангуляції можна визначити точне місце аварії, порівнюючи час прибуття сигналу до різних точок мережі. Спеціальні датчики на лініях передають сигнали, які виявляються на пунктах вимірювання. Різниця в часі досягнення сигналу дозволяє визначити точне місце пошкодження.

Цей метод є досить точним, однак його застосування вимагає наявності великої кількості сенсорів на різних ділянках ліній, що робить систему складною та дорогавартісною. В Україні він застосовується в основному на важливих високовольтних лініях, де точність і швидкість визначення місця пошкодження мають критичне значення.

Системи автоматизованого контролю і управління, зокрема SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), активно впроваджуються в Україні для локалізації пошкоджень в електричних мережах. Ці системи дозволяють в реальному часі збирати дані з різних точок мережі, аналізувати їх та автоматично виявляти можливі проблеми. Одним із значних досягнень є інтеграція таких систем з релейним захистом, що дозволяє оператору не тільки отримати сигнал про аварію, але й точно визначити її місце.

Використання SCADA систем у поєднанні з автоматизованими вимикачами дозволяє швидко ізолювати пошкоджену ділянку, що зменшує час відключення та обмежує економічні втрати. В Україні такі технології використовуються в основному на об'єктах високого та середнього напруги, таких як трансформаторні підстанції та центри розподілу енергії.

Застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) в Україні для локалізації пошкоджень у електричних мережах є новітнім і перспективним методом. Дрони дозволяють оперативно обстежувати великі території, проводити візуальні огляди

ліній електропередачі, виявляти механічні пошкодження, а також здійснювати детальний моніторинг стану мережі в реальному часі.

Цей метод є особливо корисним при відсутності можливості оперативно провести фізичний огляд, наприклад, в умовах складних погодних умов або в зоні, що важко доступна для людей. В Україні дрони використовуються для обстеження повітряних ліній, а також для визначення місць пошкоджень у важкодоступних районах.

В останні роки в Україні активно впроваджуються інтелектуальні лічильники та системи телеметрії, які дозволяють в режимі реального часу отримувати дані про стан мережі, параметри струму та напруги на різних ділянках ліній. Інтелектуальні лічильники здатні фіксувати навіть незначні зміни у мережі, що дозволяє миттєво реагувати на будь-які відхилення від норми.

Ці системи не тільки дають можливість виявляти пошкодження, але й дозволяють збирати статистичні дані для подальшого аналізу і планування робіт з обслуговування та модернізації мереж. В Україні подібні технології активно розвиваються, особливо в міських агломераціях і на критичних об'єктах енергетичної інфраструктури.

Методи локалізації пошкоджень, що застосовуються в Україні, включають широкий спектр рішень — від традиційних релейних систем і вимірювання струму короткого замикання до новітніх технологій, таких як інтеграція з автоматизованими системами управління та використання дронів. Кожен метод має свої переваги та обмеження, і для забезпечення максимальної надійності та ефективності енергетичних мереж в Україні важливо комбінувати різні технології в залежності від специфіки та масштабу мережі. Впровадження новітніх методів локалізації пошкоджень у контексті «розумних мереж» сприяє значному підвищенню надійності та економічної ефективності енергопостачання.

2.2 Аналіз та оцінка сучасних технологій локалізації пошкоджень

У сучасних умовах енергетичні мережі стикаються з низкою викликів, зокрема зі збільшенням навантажень, зміною кліматичних умов та необхідністю інтеграції відновлюваних джерел енергії. Всі ці фактори вимагають застосування нових технологій для ефективного управління і локалізації пошкоджень в мережах. Враховуючи розширення використання «розумних мереж», інтелектуальних систем та автоматизації, сучасні методи локалізації пошкоджень дозволяють значно підвищити ефективність, точність і швидкість виявлення аварій.

У цьому розділі розглянемо основні сучасні технології локалізації пошкоджень в електричних мережах, а також проведемо їх оцінку на основі ефективності, точності, економічних та технічних аспектів.

Сучасні релейні та автоматизовані системи захисту включають не тільки традиційні методи вимірювання струму, але й використовують цифрові технології для більш точної локалізації пошкоджень. Наприклад, цифрові реле в системах релейного захисту можуть оцінювати не тільки величину струму, але й його фазу, швидкість зміни та частотні характеристики, що дозволяє більш точно визначати ділянку пошкодження.

Застосування цифрових релейних систем дозволяє значно скоротити час локалізації пошкоджень, адже ці системи здатні в реальному часі виконувати аналіз сигналів з численних точок мережі та реагувати на проблеми миттєво. Як зазначає [18], сучасні релейні захисти здатні не лише ізолювати пошкоджену ділянку, а й автоматично передавати дані про місце поломки до диспетчерських центрів, що дає змогу швидко організувати відновлення роботи мережі.

Один із найбільш перспективних методів локалізації пошкоджень — це метод часу досягнення сигналу (Time-of-Flight, ToF), який використовується в багатьох сучасних системах автоматизації. За допомогою цього методу можна визначити точне місце пошкодження, вимірюючи час, за який сигнал проходить по лінії до контрольних точок.

Цей метод особливо ефективний на великих ділянках, де необхідно швидко і точно локалізувати проблему. Технологія часу досягнення сигналу широко

використовується у високовольтних мережах і дозволяє значно скоротити час відновлення постачання, оскільки система може самостійно визначати точку поломки без необхідності фізичного огляду лінії [6].

Одним із найбільш ефективних і широко впроваджуваних сучасних методів є системи моніторингу та телеметрії, що дозволяють проводити постійний контроль стану мережі. Вони здатні виявляти навіть незначні зміни в параметрах, які можуть передувати аварійним ситуаціям. Технології моніторингу використовують інтелектуальні сенсори для збору даних про стан ізоляції, навантаження на лінії та інші ключові параметри.

Системи телеметрії дають можливість здійснювати дистанційне управління і оперативно отримувати інформацію про стан ліній в реальному часі. Завдяки цим системам можна заздалегідь прогнозувати та локалізувати пошкодження, знижуючи кількість аварійних ситуацій та скорочуючи час їх ліквідації [14].

Однією з новітніх технологій для локалізації пошкоджень є використання дронів для обстеження ліній електропередачі. Дрони оснащені камерами, тепловізорами та іншими датчиками, що дозволяє швидко визначати місце пошкодження або навіть виявляти можливі проблеми до того, як вони переростуть в аварії.

Використання дронів є дуже ефективним для обстеження важкодоступних ділянок ліній, наприклад, у гористих районах чи в умовах складних погодних умов. Завдяки дрону можна оперативно оцінити стан ліній, знайти обірвані дроти або інші пошкодження, що значно скорочує час на пошук аварії і дозволяє швидше відновлювати електропостачання [1].

"Розумні мережі" (Smart Grids) є інтеграцією різноманітних технологій для автоматизації, моніторингу і управління електричними мережами. Одна з основних особливостей "розумних мереж" — це використання адаптивних систем захисту та автоматизації, які здатні автоматично локалізувати і ізолювати пошкоджені ділянки без втручання оператора.

Ці технології використовують дані з численних сенсорів, інтелектуальних лічильників, систем моніторингу та зв'язку, що дозволяють швидко визначати

місце аварії та передавати відповідні сигнали для швидкої реакції. Завдяки таким системам час на відновлення енергопостачання зменшується, а ефективність управління мережею значно покращується. Перехід до «розумних мереж» є важливим кроком у модернізації енергетичних систем і підвищенні їх надійності [12].

Сучасні методи локалізації пошкоджень є значним кроком вперед порівняно з традиційними. Однак кожна з цих технологій має свої особливості і вимоги:

- ефективність — методи часу досягнення сигналу та телеметрії є найбільш ефективними для великих мереж, оскільки дозволяють точно локалізувати пошкодження без необхідності фізичної перевірки;

- точність — цифрові реле і методи на основі тріангуляції можуть забезпечити високу точність визначення місця аварії;

- вартість — вартість впровадження технологій, таких як дрони та "розумні мережі", може бути високою на етапі інвестицій, але в довгостроковій перспективі це дозволяє значно зменшити витрати на обслуговування та відновлення постачання;

- час реакції — автоматизація та використання дронів значно зменшують час, необхідний для пошуку і усунення пошкоджень, що є критичним для забезпечення надійності енергопостачання.

Сучасні технології локалізації пошкоджень в електричних мережах надають значні переваги порівняно з традиційними методами. Вони дозволяють здійснювати швидко та точно виявлення аварійних ділянок, що покращує загальну ефективність та надійність енергопостачання. Інвестиції в інтелектуальні мережі та нові методи моніторингу є перспективним напрямом розвитку енергетичних систем України, табл. 2.1

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика традиційних та сучасних методів локалізації пошкоджень в електричних мережах

Параметр	Традиційні методи локалізації	Сучасні технології локалізації
----------	-------------------------------	--------------------------------

Метод виявлення пошкоджень	Визначення пошкодження вручну або за допомогою класичних інструментів (мультиметри, тестери).	Автоматичне виявлення через інтелектуальні сенсори, використання систем на основі IoT (Інтернету речей).
Час виявлення пошкоджень	Від кількох хвилин до кількох годин, залежно від доступності лінії і умов.	Миттєве виявлення (1-3 хвилини) завдяки інтеграції сенсорних мереж та автоматичних систем.
Метод локалізації пошкоджень	Локалізація за допомогою розподілу ліній на відрізки та перевірки кожного з них по черзі.	Автоматичне визначення точного місця пошкодження з високою точністю за допомогою сенсорів і алгоритмів на основі штучного інтелекту.
Тип системи	Аналогові системи на основі старих релейних захистів і простих механічних пристроїв.	Цифрові інтелектуальні системи з використанням сенсорів, моніторингу в реальному часі та штучного інтелекту.
Автоматизація процесу	Мінімальна автоматизація (потрібно вручну активувати процес ізоляції пошкодженої ділянки).	Повна автоматизація локалізації пошкоджень і ізоляції пошкоджених ділянок без людського втручання.
Прогнозування та попередження аварій	Неможливо або дуже обмежено, зазвичай на основі попередніх аварій або простих математичних моделей.	Використання аналізу великих даних (Big Data) та AI для прогнозування можливих аварій і виявлення аномалій до їх виникнення.
Час відновлення електропостачання	Затримки в часі через необхідність фізичного виявлення і усунення пошкодження.	Швидке відновлення через автоматичне відключення аварійної ділянки та перекидання навантаження на інші лінії.
Засоби моніторингу та діагностики	Просте технічне обладнання (вимірювальні інструменти, кабелі).	Інтелектуальні сенсори, дрони, цифрові системи моніторингу в реальному часі з інтегрованими аналітичними платформами.
Рівень точності визначення місця пошкодження	Низька точність, може бути потрібно перевіряти кілька ділянок.	Висока точність (з точністю до кількох метрів), завдяки точним сенсорам і алгоритмам.
Вартість впровадження	Висока вартість через необхідність розширеного ручного моніторингу і додаткового обладнання.	Вища початкова вартість впровадження цифрових технологій, але загальна вартість експлуатації та обслуговування нижча через автоматизацію.
Можливість інтеграції з іншими системами	Обмежена можливість інтеграції з іншими енергетичними та інформаційними системами.	Легка інтеграція з іншими системами управління енергетичними потоками, відновлювальними джерелами енергії та системами розподілу навантаження.

В Україні на сьогоднішній день активно розвиваються та впроваджуються новітні технології для локалізації пошкоджень в електричних мережах, зокрема в рамках модернізації енергетичної інфраструктури та інтеграції «розумних мереж». Однак процес інтеграції цих технологій є поступовим і значною мірою залежить від фінансових можливостей, а також від специфічних технічних та організаційних умов, властивих різним регіонам країни.

Одним із основних напрямів розвитку технологій локалізації пошкоджень є впровадження цифрових релейних систем та автоматичних вимикачів. В Україні значна частина мереж все ще працює за застарілими схемами, які не підтримують цифрові технології. Однак у найбільших енергетичних компаніях (наприклад, «Укренерго», «Київобленерго») активно впроваджуються системи цифрового

захисту, що дозволяють значно знизити час реагування на аварії та забезпечити точну локалізацію пошкоджень.

Процес цифровізації в Україні також активно підтримується державними програмами, що передбачають встановлення нових технологій на об'єктах високої та середньої напруги. Це дозволяє знизити ризики великих аварій та покращити управління енергетичними потоками. Водночас, на більшості локальних мереж і в селах, застосування таких систем ще перебуває на етапі тестування чи планування.

На сьогодні в Україні використовуються деякі елементи методів часу досягнення сигналу (ToF) для локалізації пошкоджень на лініях, особливо в межах великих мереж і для важливих магістральних ліній. Наприклад, в рамках модернізації магістральних ліній високої напруги в Київській та Львівській областях було впроваджено технології, які дозволяють відстежувати і точно визначати місце пошкодження за допомогою вивчення затримки сигналу.

Проте масштабне використання таких методів поки що обмежене через високу вартість впровадження та необхідність розгортання складної інфраструктури. Більшість таких технологій використовуються в рамках пілотних проектів на основних лініях, тоді як в менш значущих мережах використовуються традиційні методи.

В Україні починає набирати популярності використання дронів для обстеження ліній електропередач, особливо в важкодоступних місцях. Зокрема, такі методи активно використовуються для обстеження повітряних ліній на високих висотах та в районах, де неможливо провести традиційний фізичний огляд. Дрони оснащуються високоточними камерами і тепловізорами, що дозволяє виявити навіть дрібні пошкодження, такі як перегрів або розрив ізоляції.

У великих енергетичних компаніях, таких як "Укренерго" та "ДТЕК", вже проводяться пілотні проекти з використанням безпілотних літальних апаратів для моніторингу стану ліній електропередачі. У 2023-2024 роках була розроблена і впроваджена концепція автоматизованого моніторингу, яка включає в себе використання дронів для моніторингу якості мереж у реальному часі. Це дозволяє

знизити витрати часу на виявлення проблем і підвищити точність у визначенні місця пошкодження.

Одним із найбільш амбіційних проектів в Україні є розвиток "розумних мереж" (Smart Grids). Ці технології дозволяють не тільки автоматично локалізувати пошкодження, а й інтегрувати з системами управління енергетичними потоками. «Розумні мережі» дозволяють встановлювати датчики та сенсори на різних етапах енергосистеми, що дає змогу в реальному часі отримувати дані про стан мережі, а також автоматично реагувати на зміни.

В Україні кілька великих міст, таких як Київ, Одеса, Харків, почали реалізовувати проекти з впровадження інтелектуальних лічильників, автоматизованих розподільчих пунктів і інтеграції енергоефективних технологій в мережу. Проте ці технології поки що не мають широкого застосування на рівні національної мережі, і в значній мірі зосереджені на великих міських агломераціях та об'єктах стратегічного значення.

Один із перспективних напрямів в Україні — це розвиток систем прогнозування та моніторингу стану мережі за допомогою великих даних і машинного навчання. Українські енергетичні компанії починають інтегрувати в свої системи передові аналітичні інструменти, які дозволяють оцінювати ризики пошкоджень на основі аналізу історичних даних і реального стану мережі.

Проекти в рамках національної програми цифровізації енергетики (яка отримала фінансування від міжнародних донорів) передбачають створення інтегрованих систем моніторингу, які можуть попереджати про потенційні аварії ще до того, як вони стануть критичними. Проте на практиці це поки що є новим і дорогим підходом, і він ще не охоплює всі елементи енергетичної інфраструктури.

Висновки щодо оцінки сучасного стану, в Україні наразі активно відбувається впровадження сучасних технологій для локалізації пошкоджень, але процес потребує значних інвестицій. Найбільший прогрес спостерігається у великих енергетичних компаніях, таких як «Укренерго» та «ДТЕК», де вже використовуються цифрові технології захисту та дрони. Більшість новітніх технологій поки що не мають широкого розповсюдження на всі мережі країни через

високу вартість та необхідність оновлення інфраструктури. Впровадження «розумних мереж» і систем автоматичного моніторингу стану мережі обіцяє значне підвищення ефективності та надійності, однак для їх масштабного впровадження потрібно більше часу та інвестицій.

Загалом, Україна перебуває на етапі активної модернізації своїх енергетичних мереж, і більшість сучасних технологій локалізації пошкоджень перебувають на етапі впровадження та тестування, хоча й існують значні позитивні зрушення в інтеграції таких технологій у ключових об'єктах енергетичної інфраструктури.

Застосування сучасних технологій локалізації пошкоджень значно покращує ефективність, швидкість реагування та знижує витрати на обслуговування енергомереж. Впровадження цих технологій дозволяє значно зменшити час простою мережі, підвищити надійність постачання електроенергії та знизити витрати на експлуатацію системи. Україна може отримати значні переваги від переходу до цифрових і автоматизованих систем локалізації, використовуючи досвід ЄС та адаптуючи його до своїх реалій.

2.3 Адаптивні системи моніторингу та діагностики засобів локалізації пошкоджень у концепції «розумних мереж»

Системи моніторингу та діагностики пошкоджень є важливою складовою частиною «розумних мереж» (Smart Grids). Вони дозволяють не тільки своєчасно виявляти проблеми, але й автоматично локалізувати та ізолювати пошкоджені ділянки, що суттєво підвищує надійність і ефективність роботи енергетичних систем. Технології, що забезпечують такі функції, включають використання адаптивних систем моніторингу, що здатні налаштовувати свої параметри залежно від умов експлуатації мережі, а також інтелектуальні діагностичні засоби, які аналізують великі обсяги даних для передбачення потенційних аварій.

Адаптивні системи моніторингу мають здатність коригувати свою стратегію збору та аналізу даних залежно від змін у мережі. Ці системи, як правило, включають в себе високоточні сенсори, цифрові платформи для обробки даних, а

також алгоритми на основі машинного навчання та штучного інтелекту, які здатні прогнозувати і локалізувати аварії в реальному часі.

Основні компоненти адаптивних систем моніторингу та діагностики:

- сенсори та комунікаційні технології - для моніторингу напруги, струму, температури та інших параметрів мережі. ці сенсори передають дані в реальному часі на центральні платформи.
- платформи для обробки даних - для виявлення аномалій або потенційних проблем.
- аналіз даних та штучний інтелект - для передбачення і локалізації пошкоджень, оцінки ефективності ремонтних робіт та оцінки надійності мережі.

У Євросоюзі адаптивні системи моніторингу в рамках «розумних мереж» набули значного розвитку за останні кілька років, завдяки політиці цифровізації енергетичних мереж та використанню сучасних технологій для забезпечення надійності електропостачання.

В країнах ЄС активно розвивається інфраструктура цифрових релейних систем і сенсорів для локалізації пошкоджень, що дозволяє автоматично виявляти та аналізувати пошкодження без втручання людини. Приміром, в Німеччині та Великій Британії вже широко впроваджені системи, що використовують цифрові сенсори для точного визначення місця пошкодження, автоматичного відключення аварійної ділянки та попередження диспетчерів.

Важливою характеристикою системи зворотного зв'язку та прогнозування є здатність до самопідлаштування. Використання машинного навчання для прогнозування навантажень і пошкоджень дозволяє знижувати ймовірність аварійних ситуацій. Такі рішення впроваджуються в Нідерландах, Швеції та Франції, де застосовуються адаптивні системи на основі AI для обробки даних в реальному часі.

У деяких країнах ЄС використовують автоматизовані технології для швидкої локалізації пошкоджень на основі вимірювання часу досягнення сигналу (ToF). Ці

системи дозволяють не тільки миттєво визначати місце поломки, а й автоматично здійснювати комутацію для ізоляції аварійної ділянки.

Приклад ЄС: У Франції компанія EDF реалізувала проект зі встановлення адаптивних моніторингових систем, що дозволяють виявляти пошкодження та аварійні ситуації в реальному часі. Вони включають сенсори, що контролюють температурні зміни та напругу, а також програмне забезпечення для аналізу отриманих даних.

В Україні, хоча й спостерігається певний прогрес у впровадженні адаптивних систем моніторингу, ще існують значні відмінності в порівнянні з ЄС, як в аспекті технологій, так і в масштабах їх використання.

Основні напрямки розвитку адаптивних систем моніторингу в Україні:

1) Проект "Укренерго" - одним із провідних прикладів є проект «Укренерго» зі створення автоматизованої системи управління мережами, яка передбачає інтеграцію інтелектуальних сенсорів для моніторингу стану мережі. В рамках цього проекту вже встановлено сенсори, які дозволяють відстежувати параметри напруги та струму на великих лініях електропередачі.

2) Модернізація релейного захисту - в Україні також спостерігається поступове впровадження цифрових релейних захистів, хоча такі системи поки що не поширені на всю мережу. Вони використовуються лише в основних магістральних лініях та на стратегічно важливих об'єктах.

3) Проекти з дронів - в деяких регіонах України розпочато пілотні проекти із застосуванням дронів для моніторингу ліній електропередачі. Це дозволяє оперативно перевіряти стан мережі та виявляти пошкодження на важкодоступних ділянках.

Адаптивні системи моніторингу та діагностики пошкоджень у концепції «розумних мереж» є важливою складовою сучасних енергетичних систем, і Європейський Союз активно застосовує ці технології для підвищення надійності своїх мереж. В Україні є позитивні зрушення у впровадженні таких систем, але для досягнення рівня ЄС необхідно значно збільшити масштаби застосування нових

технологій, модернізувати існуючі мережі та залучити додаткові фінансові ресурси, в таблиці 2.2 вказана порівняльна характеристика адаптивних систем моніторингу та локалізації пошкоджень у «розумних мережах» в ЄС та Україні (станом на 2024 рік).

Таблиця 2.2

Порівняння адаптивних систем моніторингу та локалізації пошкоджень у «розумних мережах» в ЄС та Україні (станом на 2024 рік)

Параметр	Європейський Союз	Україна
Рівень впровадження адаптивних систем	Високий (застосовуються в 80% мереж в основних країнах ЄС)	Помірний (тільки на 15-20% основних мереж)
Кількість інтелектуальних сенсорів	Понад 2 мільйони сенсорів по всьому ЄС	Приблизно 50 000 сенсорів на основних об'єктах
Використання технології дронів	Масштабне використання (більше 30 000 в ЄС)	200-300 дронів в пілотних проектах (в основному на лініях високої напруги)
Інвестиції в адаптивні системи	Близько €10 мільярдів на рік в середньому	Оцінюється в межах 1-1,5 мільярда гривень на рік
Час реакції на пошкодження	1-3 хвилини (у більшості розвинених країн)	5-10 хвилин (в залежності від регіону та технологій)
Частка автоматично локалізованих пошкоджень	90-95% (особливо в Німеччині, Франції, Великій Британії)	30-50% (переважно на основних магістральних лініях)
Модернізація релейного захисту	Всі ключові мережі оснащені цифровими реле	Лише 40-50% важливих ліній оснащено цифровими реле
Проекти із штучним інтелектом	Застосування AI в прогнозуванні та діагностиці на рівні 50% систем	Тестування AI в пілотних проектах (планується розширення)
Кількість інтегрованих мереж з відновлюваними джерелами енергії	70-80% (інтеграція з сонячними, вітровими та іншими джерелами енергії)	15-20% (інтеграція в основному на великі об'єкти)
Покриття розумними мережами (смарт-лічильники, сенсори)	100% (переважна більшість країн ЄС)	25-30% (у великих містах, проектні зони)
Середній рівень ефективності системи	Висока (зниження часу простоя мережі до 30-40%)	Помірна (зниження часу простоя мережі на 10-20%)

Європейський Союз має значний досвід і успіхи в інтеграції адаптивних систем моніторингу та діагностики пошкоджень, що забезпечує високу ефективність, швидку реакцію та надійність мереж. Ці технології є широко впровадженими і покривають більшість важливих інфраструктурних об'єктів.

В Україні адаптивні технології лише починають розвиватися. Хоча існують окремі пілотні проекти, широкомасштабне впровадження технологій обмежене через фінансові та інфраструктурні проблеми. Тому для досягнення рівня ЄС необхідно збільшити інвестиції та прискорити модернізацію мереж.

Висновки до розділу 2

У розділі, присвяченому методам та засобам локалізації пошкоджень в електричних мережах, були розглянуті різні підходи до виявлення та визначення місця пошкодження в мережах різної складності.

Основними методами, що застосовуються для локалізації пошкоджень, є методи імпульсного тестування, часових і частотних аналізів, а також методи на основі використання відомих математичних моделей та алгоритмів оптимізації. Для кожного з цих методів були визначені переваги та недоліки залежно від специфіки мережі та виду пошкодження.

Особливу увагу в розділі приділено новітнім технологіям, таким як системи автоматизованого моніторингу і діагностики, що дозволяють в режимі реального часу відстежувати стан мережі та оперативно визначати точне місце пошкодження. Такі системи часто використовують різноманітні сенсори та алгоритми обробки сигналів, що значно знижує час на реагування та дозволяє швидко виявляти несправності на різних етапах функціонування мережі.

Із розвитку технологій зростає також роль штучного інтелекту та машинного навчання, які дозволяють прогнозувати можливі пошкодження та оптимізувати процес їх локалізації. Застосування таких підходів відкриває нові можливості для підвищення ефективності та точності роботи електричних мереж.

Загалом, сучасні методи локалізації пошкоджень в електричних мережах базуються на комплексному використанні різних технічних засобів і алгоритмів, що дозволяють оперативно і точно виявляти місце пошкодження, знижуючи час реагування та підвищуючи надійність енергопостачання. Подальший розвиток таких технологій має сприяти удосконаленню систем енергопостачання та

забезпеченню більш високого рівня безпеки та ефективності експлуатації електричних мереж.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ

3.1 Критерії ефективності систем локалізації пошкоджень

Ефективність систем локалізації пошкоджень в електричних мережах можна оцінювати за кількома критеріями, серед яких основними є:

- точність визначення місця пошкодження – система повинна точно вказувати місце пошкодження з мінімальною похибкою. Це дозволяє швидше і точніше визначити, де сталася аварія, і провести відновлювальні роботи;

- швидкість локалізації - важливим критерієм є час, який необхідний для виявлення і локалізації пошкодження після його виникнення. Чим менший цей час, тим швидше можна вжити заходів для відновлення живлення;

- стійкість до помилок та перешкод - система повинна бути стійкою до зовнішніх впливів, таких як електромагнітні завади, або до помилок у передачі даних. Вона має забезпечувати надійність навіть в умовах ненадійної комунікації або шуму в мережі;

- інтеграція з іншими системами управління - система повинна мати можливість інтеграції з іншими елементами автоматизації та управління електричними мережами, такими як системи автоматичного вимкнення або управління навантаженнями, щоб оптимізувати процеси виявлення та ліквідації аварій;

- масштабованість та адаптивність - система повинна бути здатна працювати як на малих, так і на великих енергетичних об'єктах, бути гнучкою щодо розширення та адаптації до різних типів мереж;

- вартість та економічна ефективність - вартість впровадження і експлуатації системи повинна бути обґрунтованою, з урахуванням економії, яку вона забезпечує завдяки швидшому виявленню пошкоджень і мінімізації тривалості аварій;

- надійність і безпека - система повинна бути стійкою до несправностей, мати резервні канали зв'язку та механізми аварійного відновлення для забезпечення безперебійної роботи в будь-яких умовах;

- легкість у використанні та підтримці - інтерфейс для оператора повинен бути інтуїтивно зрозумілим, а також система має забезпечувати автоматичне або напівавтоматичне визначення пошкоджень без надмірної участі людини.

Точність визначення місця пошкодження є одним з ключових критеріїв ефективності систем локалізації пошкоджень в електричних мережах. Цей аспект оцінюється за здатністю системи точно визначити місце виникнення аварії (пошкодження) в мережі з мінімальною похибкою, що важливо для оперативного виявлення проблеми і її швидкого усунення. Ось детальне пояснення цього критерію:

Для точного визначення місця пошкодження в електричних мережах застосовуються різні методи, зокрема:

- вейвлет-аналізу (швидка оцінка хвильового процесу). Цей метод дозволяє виявляти аномалії в зміні напруги та струму, які виникають при пошкодженнях, і на основі цих змін точно оцінити місце аварії;

- імпедансної лінії. Визначення місця пошкодження шляхом вимірювання змін в імпедансі лінії в результаті пошкодження. Зміна імпедансу є показником місця пошкодження, і метод дозволяє визначити відстань до пошкодження з високою точністю;

- часу проходження (Time Domain Reflectometry, TDR). За допомогою цього методу вимірюється час, необхідний для проходження сигналу до місця пошкодження та назад. Оскільки швидкість сигналу в кабелі відома, можна точно визначити відстань до місця аварії;

- «відбитого сигналу». Сигнал, що посилається по лінії, відбивається від пошкодженого місця, і за часом, який проходить до повернення сигналу, можна визначити місце аварії.

Фактори, що впливають на точність локалізації вказані на рис. 3.1

Рис. 3.1

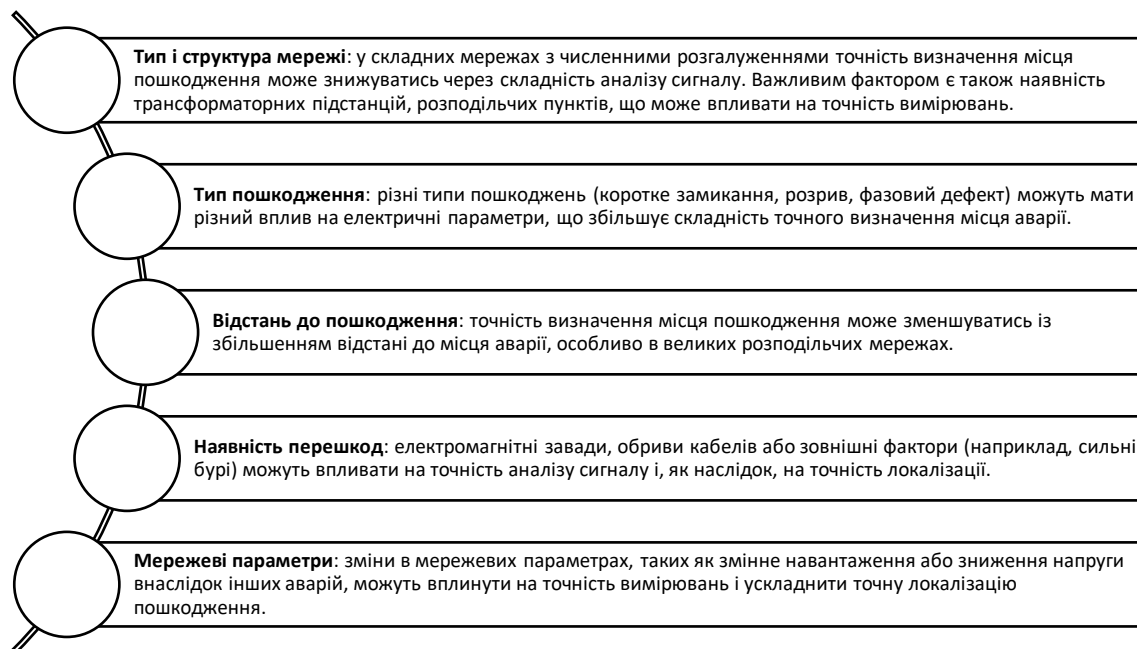


Рис. 3.1 Фактори впливу на точність локалізації

Точність визначення місця пошкодження зазвичай виражається у вигляді максимального дозволеного відхилення від реального місця пошкодження. В залежності від мережі похибка може коливатися від кількох десятків метрів до декількох сотень метрів. Для великих мереж критичними є похибки до 10–20 метрів. Час, за який система здатна точно визначити місце пошкодження, також є важливим аспектом точності. Чим швидше система визначає точне місце, тим ефективніше можна проводити ремонтні роботи, що зменшує тривалість перебоїв з електропостачанням.

Для покращення точності використовують системи на основі цифрової обробки сигналів, що дозволяє знижувати похибки в процесі аналізу змін напруги та струму в мережі, тим самим підвищуючи точність визначення місця пошкодження, а також інтеграцію з іншими системами моніторингу – використання даних від систем моніторингу стану обладнання (наприклад, трансформаторів, перетворювачів) дозволяє покращити точність шляхом коригування результатів виявлення пошкоджень, враховуючи реальні параметри мережі.

Точне визначення місця пошкодження дозволяє оперативно направити ремонтні бригади до необхідної ділянки, що мінімізує час на відновлення живлення, до того ж коли місце пошкодження визначено точно, ремонтні роботи стають менш трудомісткими і економічно ефективними. Варто відзначити, що зменшення часу на локалізацію та усунення пошкоджень підвищує загальну надійність роботи електричних мереж, знижуючи ймовірність виникнення масштабних відключень.

Приклади систем з високою точністю локалізації:

- Системи автоматичного виявлення пошкоджень (Fault Location, Isolation, and Service Restoration, FLISR), що використовують передові алгоритми і технології для точного визначення місця пошкодження та швидкого відновлення електропостачання.

- Підземні та надземні кабельні мережі можуть використовувати системи з вбудованими сенсорами для вимірювання змін імпедансу або часу проходження сигналу, що дозволяє точно локалізувати пошкодження в реальному часі.

Загалом, точність визначення місця пошкодження є критично важливим фактором для забезпечення ефективної роботи електричних мереж і зниження часу на відновлення постачання. Високоточні системи дозволяють значно підвищити надійність і стабільність енергетичних мереж.

Таким чином, ефективність системи локалізації пошкоджень визначається її здатністю точно, швидко та економічно виявляти пошкодження, підтримувати стабільність і безпеку роботи мережі при мінімальних витратах.

Швидкість локалізації пошкодження є одним з найважливіших критеріїв ефективності систем локалізації пошкоджень в електричних мережах. Від цього залежить, наскільки оперативно можна вжити заходів для відновлення електропостачання, що в свою чергу зменшує час, протягом якого споживачі залишаються без електрики.

Швидка локалізація пошкодження є критично важливою для:

- Зменшення тривалості аварійних відключень. Чим швидше система визначає місце пошкодження, тим оперативніше можна розпочати ремонтні роботи, що скорочує час відновлення живлення.

- Оптимізація роботи ремонтних бригад. Завдяки швидкому визначенню місця пошкодження ремонтні бригади можуть бути спрямовані безпосередньо на точне місце аварії, що знижує час пошуку проблеми і підвищує ефективність роботи.

- Запобігання виникненню вторинних аварій. Швидке виявлення і ізоляція місця пошкодження дозволяє обмежити поширення дефекту на інші ділянки мережі, що знижує ризик масштабних відключень і пошкодження обладнання.

Швидкість локалізації пошкоджень залежить від ряду факторів, відображені на рис. 3.2

Рис. 3.2

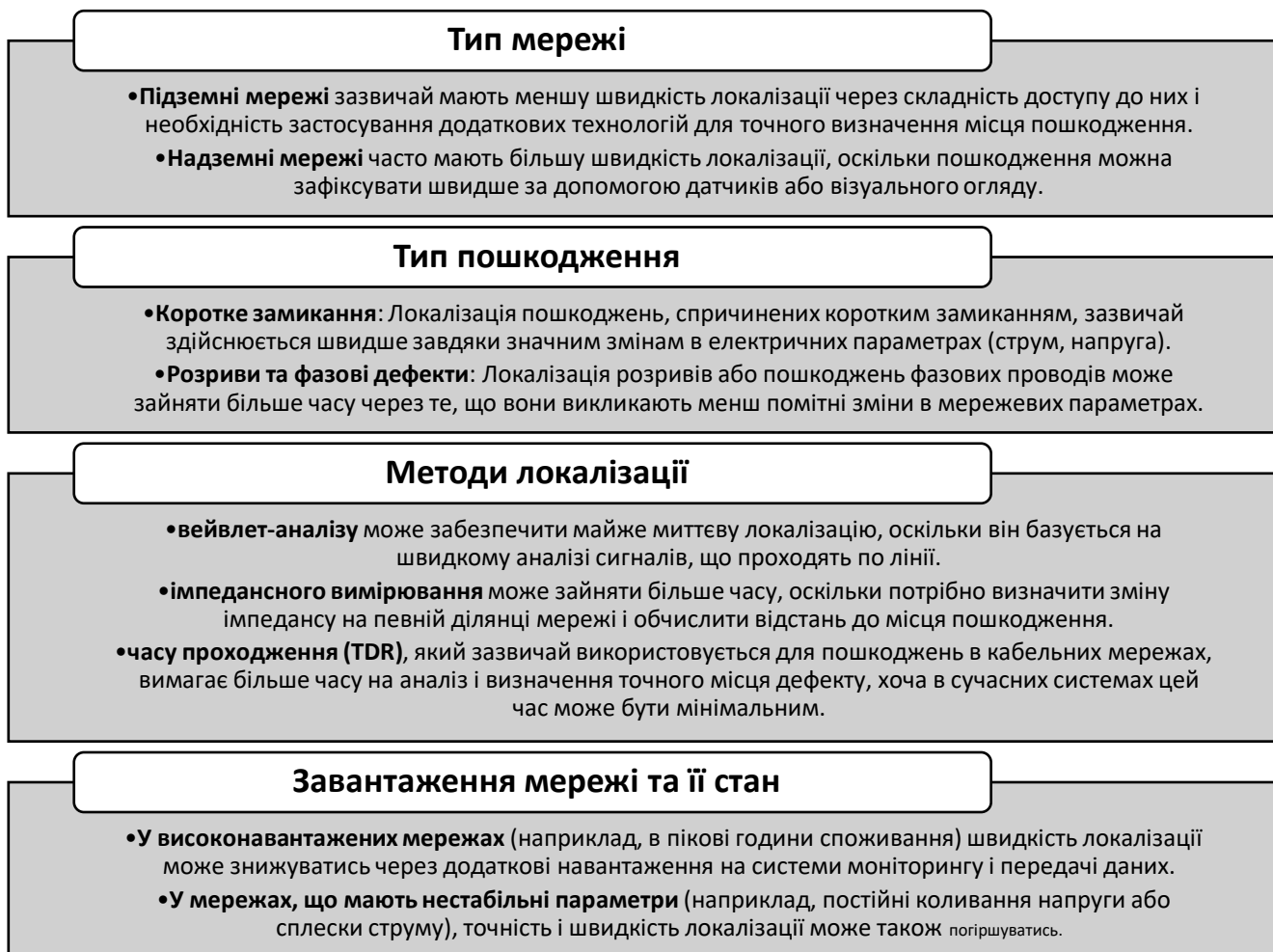


Рис. 3.2 Фактори, від яких залежить швидкість локалізації пошкоджень

Ключовими аспектами для швидкості локалізації пошкоджень є:

- **час реакції системи** - необхідний для виявлення та обробки даних про аварію після її виникнення. Він може становити від декількох мілісекунд до кількох секунд в залежності від системи;

- **час локалізації** - після того як система виявила пошкодження, необхідно визначити його точне місце. Цей етап займає від кількох секунд до декількох хвилин, залежно від складності мережі і методу, який використовується;

- **час на відновлення** - після локалізації пошкодження важливо визначити, як швидко можна відновити живлення. Система, яка має можливість автоматично відключити пошкоджену ділянку та з'єднати інші частини мережі, дозволяє зменшити час відновлення постачання.

Для досягнення високої швидкості локалізації використовуються такі підходи:

- а) використання автоматичних систем, які можуть не тільки виявити пошкодження, а й одночасно визначити його місце. Це дозволяє скоротити час, витрачений на ручне обстеження та ухвалення рішень;
- б) встановлення в мережі датчиків, що безперервно відстежують зміни в параметрах напруги та струму, дає можливість отримувати дані про пошкодження в реальному часі і оперативно їх аналізувати;
- в) системи з використанням штучного інтелекту та машинного навчання, що передбачають використання алгоритмів, які здатні за короткий час аналізувати велику кількість даних і надавати точні прогнози щодо місця пошкодження.

Як приклади високошвидкісних систем локалізації можна вказати - FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration) — це система, яка дозволяє не тільки виявляти пошкодження, але й автоматично відновлювати енергопостачання, ізолюючи пошкоджену ділянку. FLISR забезпечує швидку локалізацію та ізоляцію пошкодженої ділянки, що зменшує час відключення. Системи на основі TDR та імпедансного аналізу — використовуються для швидкої локалізації пошкоджень в кабельних мережах. У новітніх системах час виявлення може становити лише кілька секунд. Системи на основі вейвлет-аналізу та фазових зсувів — дозволяють визначити місце пошкодження дуже швидко, оскільки базуються на вимірюванні миттєвих змін в електричних параметрах мережі.

Швидкість локалізації пошкоджень в електричних мережах — це важливий фактор, який безпосередньо впливає на ефективність аварійного реагування, час відновлення електропостачання та загальну надійність мережі. Використання передових технологій, автоматизації та інтеграції з іншими системами дозволяє значно знизити час локалізації і підвищити оперативність реагування на пошкодження.

Стійкість до помилок та перешкод є важливим аспектом ефективності систем локалізації пошкоджень в електричних мережах. Враховуючи складність та різноманітність умов експлуатації енергетичних мереж, здатність системи надійно функціонувати в умовах шуму, помилок або несправностей є ключовим фактором для забезпечення безперебійної роботи і швидкої реакції на аварії.

Стійкість системи до помилок і перешкод визначається кількома факторами, серед яких: електромагнітні завади (ЕМЗ), помилки в обробці даних, шум в каналах передачі даних, зміни в параметрах мережі.

Якщо система локалізації пошкоджень відчуває помилку або заваду, вона може автоматично перезавантажити свою частину програмного або апаратного забезпечення, щоб відновити нормальну роботу. Використання мереж з елементами самовідновлення, де пошкоджені ділянки можуть бути ізольовані, а система автоматично визначає інші шляхи передачі сигналу або відновлення живлення. Розподілені системи, які мають локальні обчислювальні потужності для обробки даних, знижує залежність від центрального процесора і дозволяє зменшити ймовірність системних помилок.

Стійкість до помилок і перешкод є важливим критерієм, що забезпечує точність і надійність системи локалізації пошкоджень в електричних мережах. Використання спеціалізованих технологій для фільтрації шуму, резервування каналів зв'язку, адаптивних алгоритмів та автоматичних систем діагностики дозволяє мінімізувати вплив перешкод, знижуючи ймовірність помилок.

Інтеграція з іншими системами управління — це важливий аспект ефективності систем локалізації пошкоджень в електричних мережах. Цей критерій охоплює здатність системи локалізації не лише автономно визначати місце пошкодження, але й взаємодіяти з іншими компонентами інфраструктури для оптимізації управління енергетичними процесами, покращення безпеки та підвищення надійності мережі.

Інтеграція системи локалізації з іншими системами управління дозволяє значно покращити загальну ефективність роботи енергетичної інфраструктури, зокрема коли система локалізації пошкоджень інтегрована з іншими управлінськими та моніторинговими системами, це дозволяє оперативно отримати необхідну інформацію про стан мережі, координувати дії аварійних бригад та відновити енергопостачання. Інтеграція з іншими системами дозволяє розподіляти ресурси (ремонтні бригади, обладнання) більш ефективно, оскільки система має повнішу картину стану мережі. Автоматична ізоляція пошкодженої ділянки та

перенаправлення енергопостачання на здорові сегменти мережі зменшує вплив аварії на споживачів.

Інтеграція з іншими системами управління вимагає взаємодії з різними підсистемами енергетичної інфраструктури, такими як SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — це система для централізованого збору і моніторингу даних з об'єктів, таких як підстанції та розподільчі пункти. Вона дозволяє операторам відслідковувати стан мережі в реальному часі та здійснювати контроль за процесами; Система FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration) дозволяє не тільки локалізувати пошкодження, але й автоматично ізолювати пошкоджений сегмент мережі та відновити живлення на інших ділянках; Системи DR використовуються для оптимізації розподілу енергії та зниження навантаження на мережу шляхом коригування споживання електричної енергії в залежності від потреби та доступних ресурсів; DMS (Distribution Management Systems) — це система для управління і оптимізації роботи розподільчої мережі. Вона забезпечує автоматичне керування режимами роботи мережі, планування та моніторинг процесів; Системи моніторингу стану обладнання (Condition Monitoring Systems), що постійно відстежують технічний стан ключових компонентів мережі, таких як трансформатори, вимикачі, лінії передачі, з метою виявлення ознак несправностей до того, як вони призведуть до серйозних аварій.

Можна виділити кілька типів інтеграції в енергетичних системах: технології та підходи. Інтеграція через стандартні протоколи, такі як IEC 61850, DNP3 і Modbus, дозволяє забезпечити взаємодію між різними системами автоматизації і управління. Ці протоколи забезпечують обмін даними в реальному часі між різними компонентами, що дозволяє передавати точну інформацію про місце пошкодження до SCADA або DMS для автоматичного вжиття заходів щодо ізоляції і відновлення. Веб-сервіси та API також використовуються для інтеграції систем обміну даними без потреби в значних модифікаціях існуючих систем. Вони дозволяють передавати дані з локалізації пошкоджень і отримувати зворотний зв'язок, що допомагає координувати дії з усунення аварій.

Системи на основі хмарних технологій забезпечують централізоване зберігання, аналіз і обробку даних з різних систем, що дозволяє створювати єдину інформаційну базу для координації дій і отримання повної картини пошкоджень. Переваги інтеграції з іншими системами включають покращення ефективності реагування, оскільки швидка передача даних дозволяє скоротити час на реагування та усунення аварії. Інтеграція також дозволяє автоматизувати процеси, такі як ізоляція пошкоджених ділянок, перенаправлення навантаження та відновлення постачання без втручання оператора. Це підвищує надійність і стабільність мережі, оскільки автоматичне регулювання її функціонування знижує ймовірність поширення аварій та підвищує загальну стабільність системи.

Масштабованість та адаптивність є важливими характеристиками систем локалізації пошкоджень в електричних мережах, оскільки ці системи повинні ефективно працювати як у малих, так і в великих енергетичних об'єктах. Крім того, система повинна бути здатна адаптуватися до змінних умов і різних типів мереж (наприклад, високовольтних, середньовольтних, розподільчих або спеціалізованих мереж).

Масштабованість системи локалізації пошкоджень передбачає її здатність ефективно працювати з різними розмірами енергетичних мереж. Для малих об'єктів, таких як розподільчі підстанції або локальні мережі, можуть бути достатні базові функції локалізації пошкоджень, а для великих мереж, таких як національні або регіональні енергетичні мережі, потрібні складніші алгоритми для обробки великих обсягів даних та більш масштабовані інфраструктурні рішення. Лінійне та модульне розширення є важливим аспектом для великих мереж, оскільки система повинна мати можливість розширюватися без значних витрат на зміну архітектури. Це може бути досягнуто за допомогою модульного підходу, де додавання нових компонентів або об'єктів не потребує перепрограмування або значних змін в існуючій системі, а нові елементи підключаються через стандартизовані інтерфейси. Розподілена архітектура також є важливою для ефективного масштабування, оскільки вона дозволяє системі працювати автономно на різних елементах і обмінюватися даними в реальному часі без втрати продуктивності.

Адаптивність системи забезпечується через використання інтелектуальних алгоритмів, які здатні враховувати різні характеристики мережі, такі як її топологія, типи підстанцій та рівень навантаження, а також змінні умови, такі як погодні фактори чи сезонні зміни навантаження. Система повинна бути здатна коригувати свої стратегії локалізації пошкоджень відповідно до зовнішніх факторів або технічних проблем. Крім того, адаптація до нових технологій є важливою для забезпечення підтримки нових типів обладнання та технологій, таких як відновлювальні джерела енергії або розумні мережі.

Вартість впровадження та експлуатації системи є важливим фактором, оскільки система повинна забезпечувати економічну вигоду в порівнянні з витратами на її впровадження та обслуговування. Оцінка економічної ефективності базується не лише на витратах на закупівлю та встановлення, але й на довгострокових вигодах, які система забезпечує. Початкові витрати включають витрати на розробку та впровадження системи, програмне та апаратне забезпечення, інтеграцію з іншими системами управління, навчання персоналу та інші витрати. Для специфічних мереж може бути потрібна додаткова кастомізація програмного забезпечення, що збільшує вартість, але використання стандартних рішень і модульних компонентів допомагає зменшити витрати. Економія від швидшого виявлення пошкоджень полягає в зниженні тривалості аварій, що знижує час відновлення електропостачання і мінімізує простої, а отже, приносить економічну вигоду у вигляді зниження витрат на відновлення, компенсації споживачам та економії енергії. Точна локалізація пошкоджень зменшує обсяг необхідних ремонтних робіт, дозволяючи ремонтним бригадам швидше та точніше вирушати до місця пошкодження. Окупність системи визначається підвищенням надійності мережі, оскільки економічні вигоди від підвищення надійності та зниження витрат на обслуговування дозволяють системі окупитися через зниження операційних витрат. Вартість обслуговування повинна бути мінімальною, з легкістю в оновленнях програмного забезпечення та ремонтах. Використання стандартних технологій і протоколів знижує витрати на довгострокове обслуговування.

Надійність і безпека системи локалізації пошкоджень мають критичне значення для безперебійної роботи енергетичної мережі. Система повинна бути стійкою до технічних несправностей, атак або інших непередбачених ситуацій. Для забезпечення безперебійної роботи необхідно створення резервних каналів зв'язку, дублювання критичних компонентів системи, таких як сервери, бази даних і канали передачі даних. У разі збою система повинна автоматично перемикатися на резервні канали або використовувати альтернативні алгоритми для виявлення і локалізації пошкоджень. Для захисту від несанкціонованого доступу та кібератак необхідно застосовувати сучасні методи шифрування даних, як під час передачі, так і на зберіганні. Потрібно також використовувати багаторівневу аутентифікацію для доступу до системи, щоб уникнути несанкціонованого втручання. Система повинна мати чітко визначені процедури аварійного відновлення, що дозволяє швидко відновити роботу у разі неполадок. Це включає автоматичне перемикання на резервні маршрути даних або ізоляцію непрацездатних компонентів мережі.

Легкість у використанні та підтримці є важливими факторами для ефективної експлуатації системи. Оператори повинні мати змогу швидко і точно реагувати на ситуації, а система повинна бути доступною для швидкого обслуговування і оновлення. Інтерфейс системи повинен бути зрозумілим і зручним для оператора, щоб він міг швидко отримати необхідну інформацію про стан мережі, виявити місце пошкодження і оцінити масштаб аварії. Використання графічних інтерфейсів для візуалізації інформації про пошкодження допомагає оператору швидко орієнтуватися. Система повинна забезпечувати автоматичне або напівавтоматичне визначення місць пошкоджень без необхідності в постійному втручанні оператора, що знижує навантаження на персонал і дозволяє оперативно реагувати. Крім того, система повинна надавати можливість для легкого доступу до технічної документації, інструкцій і звітів, що полегшує підтримку та оновлення. Система повинна бути гнучкою і підтримувати можливість оновлення програмного забезпечення або додавання нових функціональностей без складних процедур.

Для ефективної роботи системи локалізації пошкоджень в електричних мережах важливо забезпечити високу масштабованість, економічну ефективність,

надійність, безпеку, а також зручність в експлуатації та підтримці. Всі ці фактори разом сприяють зниженню витрат на ремонт і технічне обслуговування, підвищенню надійності мережі та забезпеченню безперебійної роботи енергетичних систем.

Система локалізації пошкоджень в електричних мережах повинна відповідати низці важливих вимог для забезпечення її ефективності та надійності. Точність визначення місця пошкодження є ключовою для швидкої ліквідації аварії, зменшення часу відновлення енергопостачання та мінімізації збитків. Швидкість локалізації безпосередньо впливає на зменшення часу простою мережі, що критично важливо для зниження економічних втрат. Система повинна бути стійкою до помилок і перешкод, що можуть виникнути через технічні збої або зовнішні фактори, забезпечуючи безперебійне функціонування навіть за несприятливих умов.

Інтеграція з іншими системами управління підвищує загальну ефективність, дозволяючи автоматизувати ізоляцію пошкоджених ділянок і перенаправлення енергопостачання. Масштабованість і адаптивність дозволяють системі працювати на різних типах енергетичних об'єктів і гнучко адаптуватися до змін у мережі, що важливо для її довгострокової ефективності. Вартість і економічна ефективність системи повинні бути обґрунтованими, оскільки вона має приносити вигоди завдяки швидшому виявленню пошкоджень і зменшенню витрат на ремонт та відновлення.

Для ефективної локалізації пошкоджень у розподільних системах доцільно поєднувати традиційні методи релейного захисту з сучасними цифровими технологіями. Традиційні методи, зокрема струмові та напругові релейні захисти, залишаються основою для виявлення коротких замикань, але часто вимагають додаткового часу для точного визначення місця пошкодження в складних мережах. Сучасні методи, такі як диференціальний захист з цифровими реле, а також технології на основі вимірювання фазових зсувів і аналізу параметрів в реальному часі (наприклад, за допомогою систем, заснованих на принципах фазового аналізу

чи використання векторних діаграм), дозволяють значно підвищити точність і швидкість локалізації пошкоджень.

Перспективним є впровадження гібридної системи захисту, яка комбінує традиційні струмові реле з цифровими технологіями, здатними в реальному часі аналізувати дані з усіх ділянок мережі, автоматично локалізувати місце пошкодження та забезпечувати швидке відключення пошкоджених ділянок. Такий підхід дозволить не тільки знизити час відновлення енергопостачання, але й підвищити надійність та безпеку розподільних систем в умовах зростаючої складності енергетичних мереж.

Надійність і безпека є критичними для забезпечення безперебійної роботи, тому система повинна мати механізми резервування і захисту від кіберзагроз. Легкість у використанні та підтримці важлива для зручності операторів та зниження витрат на обслуговування. Система повинна бути інтуїтивно зрозумілою і забезпечувати автоматизоване виявлення пошкоджень для мінімізації людських помилок.

Загалом, для ефективної роботи системи локалізації пошкоджень необхідно забезпечити точність, швидкість, економічність, надійність та зручність експлуатації, що разом сприяють підвищенню стабільності та ефективності енергетичних мереж.

3.2 Порівняльний аналіз традиційних і сучасних методів

Порівняльний аналіз традиційних і сучасних методів локалізації пошкоджень в електричних мережах дозволяє оцінити ефективність різних підходів до виявлення та усунення аварій. Кожен метод має свої переваги та обмеження, що залежать від типу мережі, її масштабів, а також вимог до точності та швидкості реагування.

Традиційні методи локалізації пошкоджень в основному базуються на механічних або електричних вимірюваннях, що здійснюються вручну або за допомогою простих автоматизованих засобів.

Основні методи включають:

- Метод короткого замикання (імпедансний метод) - визначення місця пошкодження на основі вимірювання змін у параметрах мережі, таких як опір або напруга. Цей метод широко застосовується в розподільних мережах, але його точність залежить від численних зовнішніх факторів, таких як довжина лінії, характер навантаження та ін.

- Метод за допомогою патрулювання - патрулювання працівниками мережі для виявлення пошкоджень, що є трудомістким і витратним процесом. Цей метод не дає змоги швидко локалізувати пошкодження, особливо у великих мережах або в складних умовах.

- Метод визначення по кінцевій точці - визначення місця пошкодження за допомогою контролю напруги в кінцевих точках лінії. Метод часто використовується у разі коротких ліній або для точних визначень на підстанціях, проте його застосування обмежене на більших ділянках мережі.

Сучасні методи локалізації пошкоджень використовують високотехнологічні підходи, що включають інтелектуальні датчики, автоматизовані системи управління та аналітичні технології для підвищення точності та швидкості локалізації. Серед них:

- Імпедансний метод з цифровими мікропроцесорними пристроями, завдяки використанню цифрових технологій для вимірювання і обробки параметрів мережі цей метод дозволяє більш точно визначати місце пошкодження, навіть у складних мережах з великою кількістю елементів.

- Метод відстані з використанням часового інтервалу (TDR), що використовує час, який необхідний для проходження сигналу від джерела до місця пошкодження. Він дає можливість швидко локалізувати точку пошкодження за допомогою відправки імпульсів і вимірювання часу їх повернення. Підходить для виявлення пошкоджень на великих відстанях і в лініях з високим рівнем шуму.

- Методи на основі вбудованих сенсорів та бездротових технологій - використання IoT (Internet of Things) технологій для створення мережі

датчиків, що безперервно вимірюють електричні параметри (напруга, струм, температура), дозволяє отримувати реальну інформацію про стан мережі в режимі реального часу. Дані з сенсорів можуть передаватися на центральну систему управління, що дає можливість автоматично визначити місце пошкодження.

- Інтелектуальні системи (SCADA, DMS, FLISR), які використовують алгоритми для автоматичної діагностики та локалізації пошкоджень, спираючись на дані з датчиків, вимикачів і інших інфраструктурних елементів. Вони дозволяють здійснювати не лише виявлення пошкоджень, а й автоматичне перенаправлення енергопостачання або ізоляцію пошкоджених ділянок без втручання оператора.

Традиційні методи мають обмежену точність, що може призвести до помилок при визначенні точного місця пошкодження і як правило, є більш повільними через необхідність фізичної перевірки або механічних вимірювань. Сучасні методи, завдяки цифровим технологіям та інтелектуальним системам, дозволяють досягти високої точності навіть у складних умовах і можуть автоматично виявляти пошкодження та передавати дані для миттєвого реагування.

Варто відзначити, що провадження традиційних методів є дешевшим на початковому етапі, однак вони можуть вимагати більших витрат на обслуговування і більше часу для усунення пошкоджень. Сучасні системи мають високу вартість на етапі впровадження, але з часом можуть забезпечити суттєву економію завдяки скороченню часу на усунення аварій і мінімізації збитків, переваги та недоліки вказані в табл. 3.1

Таблиця 3.1

Переваги та недоліки традиційних та сучасних методів локалізації пошкоджень в електричних мережах

Методи	Переваги	Недоліки
Традиційні методи	-Простота і доступність.	-Низька точність, особливо в умовах складної топології мереж.

	-Можливість використання без складного обладнання.	-Тривалість процесу локалізації, що може призвести до значних простоїв.
--	--	---

Продовження табл. 3.1

		-Високий рівень людського втручання та залежність від оперативних дій персоналу.
Сучасні методи	-Висока точність і швидкість локалізації.	-Висока вартість впровадження і обслуговування.
	-Можливість роботи в реальному часі, що дозволяє швидко усувати аварії.	-Потреба в висококваліфікованому персоналі для налаштування та підтримки систем.
	-Автоматизація процесу з мінімальним втручанням людини.	-Залежність від надійності сенсорних мереж і комунікаційних каналів.
	-Підвищена надійність завдяки інтеграції з іншими системами управління та резервними каналами зв'язку.	

Сучасні методи локалізації пошкоджень є більш ефективними, точними і швидкими, ніж традиційні, завдяки використанню інтелектуальних технологій, автоматизації і новітніх сенсорних систем. Однак вони потребують значних початкових інвестицій і висококваліфікованого персоналу для підтримки. Традиційні методи, хоча й дешевші в плані впровадження, мають обмеження в точності та швидкості реагування, що може призвести до більших економічних втрат в разі масштабних пошкоджень або аварій. Тому вибір між цими методами залежить від конкретних умов експлуатації мережі та доступного бюджету. Порівняння переваг і недоліків традиційних і сучасних методів локалізації пошкоджень в електричних мережах відповідно до основних критеріїв вказано в табл.3.2

Таблиця 3.2

Переваги та недоліки згідно критеріям ефективності систем локалізації пошкоджень в електричних мережах

Критерій	Традиційні методи	Сучасні методи
----------	-------------------	----------------

Точність локалізації	Низька точність, залежить від умов мережі	Висока точність завдяки цифровим технологіям та сенсорам
Швидкість реагування	Повільне виявлення через ручне втручання або механічні вимірювання	Швидке автоматичне виявлення і реагування

Продовження табл. 3.2

Вартість впровадження	Низька початкова вартість, але високі витрати на обслуговування	Висока вартість впровадження і обслуговування, але вигідно в довгостроковій перспективі
Надійність і безпека	Залежить від людського фактора та технічних збоїв	Вища надійність завдяки автоматизації, резервним каналам і захисту від помилок
Масштабованість	Обмежена для великих і складних мереж	Висока масштабованість, підходить для великих і складних мереж
Легкість в експлуатації	Потребує значного людського втручання	Легкість в управлінні та автоматизація процесів

Переваги і недоліки традиційних і сучасних методів локалізації пошкоджень в електричних мережах.

3.3 Вплив надійності локалізації на загальну ефективність розподільних мереж

Надійність системи локалізації пошкоджень має прямий вплив на загальну ефективність розподільних (відновлювальних) мереж, що використовуються для забезпечення безперебійного енергопостачання. Розподільні мережі включають в себе елементи, які дозволяють автоматично ізолювати пошкоджені ділянки та перенаправляти енергопостачання, мінімізуючи таким чином вплив аварій на більшу частину мережі.

Надійність системи локалізації безпосередньо впливає на швидкість виявлення пошкоджень, що є критично важливим для ефективної роботи розподільної мережі. Якщо система точно і швидко визначає місце пошкодження, це дозволяє оперативно ізолювати аварійну ділянку, не пошкоджуючи інші частини мережі. Чим точніша локалізація, тим менше буде необхідно відключати енергопостачання для інших споживачів, що значно підвищує загальну ефективність мережі.

Надійна система локалізації дозволяє впроваджувати автоматизовані процеси управління, такі як FLISR (Fault Location, Isolation and Service Restoration). Це система, яка автоматично визначає місце пошкодження, ізолює його і відновлює енергопостачання до решти мережі. Висока точність і надійність локалізації пошкоджень дозволяють мінімізувати час відновлення та зменшити вплив аварії на функціонування мережі, що підвищує її ефективність.

Від надійності локалізації залежить, наскільки швидко буде відновлене енергопостачання після аварії. Точна локалізація дозволяє зменшити час на пошук пошкодженої ділянки, а отже, швидше реалізувати ремонтні роботи або перенаправлення енергопостачання через альтернативні шляхи. Це є важливим для зменшення тривалості відключень і забезпечення високої надійності енергопостачання.

Ефективна система локалізації пошкоджень забезпечує мінімізацію простоїв і економічних втрат, що особливо важливо в розподільних мережах. Якщо пошкодження виявляються швидко і точно, це дозволяє зменшити обсяг необхідних ремонтів і витрат на ліквідацію аварій. Система може автоматично ізолювати лише пошкоджену ділянку, що дозволяє зберегти роботу інших частин мережі і знизити загальні економічні втрати для підприємства.

Надійність локалізації пошкоджень має критичне значення для стабільності розподільної мережі. Погана локалізація може призвести до неправильної ізоляції ділянок, що викликає додаткові проблеми або навіть збільшує кількість аварій. Надійна система локалізації дозволяє підтримувати стабільність енергопостачання, мінімізуючи ймовірність системних відмов.

Надійність системи локалізації пошкоджень є важливим чинником, який суттєво підвищує загальну ефективність розподільних мереж. Висока точність і швидкість визначення місця пошкодження дозволяють мінімізувати час відключення, знижують економічні втрати та підвищують стабільність роботи мережі. Автоматизація та точне ізолювання пошкоджених ділянок сприяють збереженню безперебійного енергопостачання для інших частин мережі, що робить систему більш ефективною і економічною в довгостроковій перспективі.

Висновки до розділу 3

Всі аспекти, пов'язані з локалізацією пошкоджень в електричних мережах, мають велике значення для забезпечення стабільної і безперебійної роботи енергетичної інфраструктури. Точність і швидкість визначення місця пошкодження, стійкість до помилок і перешкод, інтеграція з іншими системами, масштабованість і економічна ефективність безпосередньо впливають на загальну ефективність системи, а також на можливість швидко реагувати на аварії і мінімізувати наслідки для мережі та споживачів.

Точність локалізації пошкоджень є критичним фактором для ефективного відновлення енергопостачання. Чим точніше визначається місце аварії, тим швидше можна ізолювати пошкоджену ділянку і забезпечити енергопостачання для інших частин мережі. Це особливо важливо в умовах великих та складних мереж, де помилки в локалізації можуть призвести до значних економічних втрат і затримок у відновленні.

Швидкість виявлення і локалізації пошкоджень безпосередньо впливає на час відновлення енергопостачання. Завдяки швидким реакціям системи можна оперативно змінити налаштування мережі, перенаправити навантаження або здійснити автоматичну ізоляцію пошкодженої ділянки. Це значно зменшує час простоя і підвищує ефективність енергетичної інфраструктури.

Стійкість до помилок і перешкод є важливим критерієм, оскільки надійність системи повинна бути гарантована навіть у складних умовах, коли можуть виникнути зовнішні перешкоди, технічні збої або непередбачувані ситуації. Це дозволяє зберігати стабільність роботи мережі і швидко відновлювати її функціонування в разі виникнення несправностей.

Інтеграція з іншими системами управління, такими як SCADA або FLISR, підвищує ефективність локалізації пошкоджень і дозволяє автоматизувати процеси ізоляції пошкоджених ділянок і відновлення енергопостачання. Це робить систему

більш зручною для операторів і сприяє більш ефективному управлінню мережею в реальному часі.

Масштабованість і адаптивність системи дозволяють їй ефективно використовуватися як на малих, так і на великих енергетичних об'єктах. Це забезпечує можливість розширення та адаптації системи до нових технологій і змін у мережі, що особливо важливо для довгострокового функціонування енергетичної інфраструктури.

Вартість впровадження та економічна ефективність системи також є важливими аспектами, які мають вплив на вибір рішення. Вартість системи повинна бути обґрунтованою з точки зору економії, яку вона приносить, завдяки зменшенню часу на локалізацію пошкоджень, зниженню витрат на обслуговування та ремонти і покращенню загальної ефективності мережі.

Надійність і безпека системи мають велике значення для забезпечення безперебійної роботи мережі. Важливо, щоб система мала надійні канали зв'язку, резервні механізми і засоби захисту від можливих збоїв або зовнішніх загроз, що забезпечить її стабільну роботу у будь-яких умовах.

Легкість у використанні та підтримці системи дозволяє зменшити навантаження на персонал і підвищити загальну ефективність. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і можливість автоматичного виявлення пошкоджень забезпечують зручність в експлуатації і знижують ймовірність помилок через людський фактор.

Сучасні методи локалізації пошкоджень значно переважають традиційні завдяки більшій точності, швидкості, надійності та можливості інтеграції з іншими системами управління. Однак традиційні методи все ще використовуються через свою низьку вартість і простоту впровадження, хоча вони обмежені в своїх можливостях. У сучасних енергетичних мережах перевага надається інтеграції інтелектуальних систем, що забезпечують максимальну автоматизацію і ефективність.

Загалом, для ефективної локалізації пошкоджень необхідно забезпечити точність, швидкість, надійність, масштабованість та економічну вигідність

системи, а також її інтеграцію з іншими управлінськими системами. Такий підхід дозволяє значно підвищити ефективність енергетичних мереж, зменшити час простою, знизити витрати на ремонти та покращити якість енергопостачання для споживачів.

ВИСНОВКИ

У рамках виконаної магістерської роботи було проведено комплексне дослідження основних аспектів локалізації пошкоджень в електричних мережах, зокрема в контексті їх інтеграції з концепцією «розумних мереж». Завдання, поставлені в роботі, охоплюють широкий спектр питань, що стосуються теоретичних основ, сучасних технологій, а також практичних аспектів впровадження інтелектуальних систем для забезпечення надійності енергопостачання.

По-перше, в роботі досліджено основні поняття і принципи роботи розподільних електричних мереж, зокрема їх взаємозв'язок із концепцією «розумних мереж». Визначено, що розумні мережі представляють собою важливу складову розвитку енергетичних систем, оскільки вони забезпечують високу автоматизацію, зниження витрат на обслуговування і скорочення часу відновлення енергопостачання після аварій.

По-друге, було виявлено ключові складові концепції «розумних мереж» і їх роль у забезпеченні надійності енергопостачання. Системи на основі інформаційних технологій, інтеграція датчиків, а також можливості дистанційного управління і моніторингу дозволяють значно покращити ефективність енергоспоживання і забезпечити оперативне реагування на пошкодження, що є важливим для стабільності енергетичних мереж.

Також було здійснено аналіз сучасних технологій локалізації аварій, зокрема тих, що використовуються в рамках «розумних мереж». З'ясовано, що сучасні методи, такі як системи моніторингу в реальному часі, використання датчиків для визначення місця пошкодження і адаптивні системи на основі штучного інтелекту, значно підвищують точність і швидкість локалізації аварій у порівнянні з традиційними підходами.

Порівняльний аналіз традиційних і сучасних методів локалізації пошкоджень показав, що інтелектуальні технології, хоча й потребують значних початкових інвестицій, дозволяють знизити загальні витрати на експлуатацію, забезпечують

високу точність і надійність, а також інтегруються з іншими системами управління для більш ефективної роботи мережі.

Особливу увагу було приділено оцінці впливу цих методів на загальну ефективність і надійність розподільних мереж. Виявлено, що високоефективні системи локалізації пошкоджень безпосередньо впливають на здатність мережі забезпечувати безперебійне постачання електроенергії, зменшуючи час простоїв і підвищуючи стабільність енергопостачання.

У процесі роботи були розроблені практичні рекомендації щодо впровадження та оптимізації методів локалізації пошкоджень в умовах національних енергетичних систем України. Особлива увага приділялася розробці пропозицій щодо розвитку адаптивних технологій, що дозволяють покращити реакцію на аварії і зменшити вплив надійності системи на кінцевих споживачів.

В результаті роботи сформульовано рекомендації щодо подальшого розвитку адаптивних технологій та інтелектуальних систем в Україні, що дозволять підвищити надійність енергопостачання. Це включає удосконалення систем моніторингу, впровадження інноваційних підходів до локалізації пошкоджень і оптимізацію інфраструктури енергетичних мереж з урахуванням специфіки вітчизняного енергетичного сектору.

Таким чином, дослідження та аналіз сучасних технологій локалізації пошкоджень у електричних мережах дозволяє зробити висновок, що інтеграція інтелектуальних систем в енергетичну інфраструктуру є необхідним кроком до підвищення ефективності та надійності електропостачання, що є важливою складовою для розвитку сталих і ефективних енергетичних систем в Україні.

Інтеграція новітніх технологій в електричні мережі, зокрема через застосування розумних мереж, має суттєвий вплив на оперативність та точність локалізації пошкоджень. Системи, що базуються на використанні датчиків, аналізі часу поширення сигналів та автоматичних системах управління, дозволяють значно підвищити швидкість виявлення і локалізації дефектів, знижуючи час відновлення енергопостачання. Адаптивні системи, які використовують методи штучного інтелекту та машинного навчання, можуть не тільки локалізувати аварії,

а й прогнозувати потенційні проблеми, що дозволяє оперативно мінімізувати ризик їх виникнення.

Крім того, ці технології сприяють більш ефективному управлінню енергетичними потоками, знижуючи ймовірність повторних аварій та забезпечуючи стабільну роботу мережі навіть у складних умовах. Важливим аспектом є також зниження витрат на обслуговування і модернізацію мереж, оскільки сучасні методи локалізації дозволяють значно зменшити потребу в фізичних перевірках і знижують залежність від людського фактору.

Модернізація енергетичних мереж через впровадження інтелектуальних систем дає можливість створювати більш надійні й ефективні мережі, здатні швидше реагувати на зміни в стані та зменшувати перерви в постачанні електроенергії. Зокрема, поєднання автоматизованих систем управління з технологіями на основі IoT створює потужну інфраструктуру для моніторингу та контролю енергетичних мереж в реальному часі.

З огляду на це, адаптація таких методів локалізації пошкоджень в українських енергетичних системах є важливим кроком до підвищення ефективності та надійності енергопостачання, що дозволить не лише знизити витрати на обслуговування, а й покращити стійкість мереж до аварійних ситуацій. Впровадження сучасних технологій дозволить мінімізувати час простоїв, підвищити якість обслуговування споживачів і забезпечити стабільне постачання електроенергії навіть у разі непередбачених ситуацій.

Враховуючи результати проведеного дослідження, перспективним методом локалізації пошкоджень у розподільних системах є інтеграція традиційних і сучасних технологій релейного захисту в рамках концепції «розумних мереж». Традиційні методи релейного захисту, зокрема струмові та напругові реле, залишаються ефективними для виявлення коротких замикань, але часто не здатні швидко і точно локалізувати місце пошкодження в складних і розгалужених розподільних мережах. Сучасні методи, зокрема адаптивні системи, що базуються на використанні цифрових технологій, систем моніторингу в реальному часі та

штучного інтелекту, можуть значно підвищити точність і швидкість локалізації аварій.

Поєднання цих підходів дозволяє створити гібридну систему захисту, яка забезпечує миттєву локалізацію пошкоджень, знижує час відновлення енергопостачання та покращує надійність розподільних мереж. Впровадження цифрових релейних установок, які можуть інтегруватися з системами автоматизованого управління і використанням даних з датчиків, дає можливість оперативно виявляти не тільки вже існуючі аварії, але й прогнозувати потенційні проблеми, мінімізуючи ризик їх виникнення.

Для українських енергетичних систем важливим є розвиток адаптивних технологій локалізації пошкоджень, що забезпечить підвищення ефективності та надійності енергопостачання. Впровадження таких технологій дозволить не тільки знизити витрати на обслуговування, але й підвищити стабільність мереж, зменшити час простоям та забезпечити безперебійне постачання електроенергії. Зокрема, поєднання традиційних і сучасних методів у рамках «розумних мереж» відкриває нові перспективи для розвитку надійних і ефективних енергетичних систем в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гриб О.А, Є.І. Сокол, Сендерович Г.А. Релейний захист енергетичних систем. — Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. —306 с.
2. Баженов В.М. Швидкодіючий релейний захист вузлових схем живлення розподільних мереж / В.М. Баженов, М.М. Одегов // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту.— Харків, 2015. — Вип. 153. — С 73 – 79.

3. Баженов В.М. Релейний захист високовольтних ліній та трансформаторів: посібник для курсового проектування/В.М. Баженов. - Харків: НТУ «ХПІ», 2001. - 36 с.
4. Гловацький В.Г. Сучасні засоби релейного захисту та автоматики електромереж/В.Г. Гловацький, І.В. Пономарьов. - Київ: Компанія Енергомашвін, 2006.
5. Олійник Д.І. Міжнародний досвід фінансування сталого розвитку громад (на прикладі формування мережевої інфраструктури): аналіт. доповідь / Олійник Д.І. – К.: НІСД, 2017. – 48 с.
6. Козлов А. М. Технічні засоби автоматизації в енергетичних мережах. — Харків: Харківський національний університет, 2017.
7. Кириленко О.В., Стогній Б.С., Денисюк С.П. Розвиток інтелектуальних електричних мереж України на основі положень концепції Smart Grid // Зб. «Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец.випуск». – 2013, ІЕД НАНУ. – С. 5–12.
8. Левченко Т. А. Смарт грід як ключ до енергоефективності в умовах змін клімату // Сучасні проблеми енергетики. — 2022. — № 6. — С. 118–123.
9. Лук'янчук О. В., Гречаний І. А. Курс лекцій з теми "Розумні мережі та енергетичні технології". — Київ: Київський університет, 2023.
10. Марченко В. І. Технічні засоби для обстеження повітряних ліній електропередач. — Київ: Енергетика України, 2020.
11. Островський П. М. Розумні мережі: нові технології локалізації пошкоджень. — Харків: Харківська академія, 2021.
12. Остромислов О. П. Релейний захист в електричних мережах. — Львів: Академія, 2019. — 189 с.
13. Петренко І. В. Моніторинг і телеметрія в енергетичних системах // Журнал "Енергетика України". — 2021. — № 6, Т. 5. — С. 22–29.
14. Петров С. О., Дмитрів С. Г. Технології смарт грід у контексті зеленої енергетики // Тези IV Міжнародної конференції з питань енергетичних технологій. — Київ, 2023. — С. 95–97.

15. Сітенко В. М. Основи релейного захисту та автоматизації електричних мереж. — Київ: Наукова думка, 2018. — 152 с.
16. Тимощенко С. С. Електричні мережі та їх захист. — Київ: Вища школа, 2016.
17. Шевченко, І. М. Основи релейного захисту та автоматики. Одеса: ОНПУ, 2017. 190 с.
18. ДСТУ 2681-94. Системи релейного захисту і автоматики. Методи локалізації пошкоджень в електричних мережах. — Київ, 1994.
19. ISO 50001:2018. Енергетичний менеджмент: Системи управління енергетичною ефективністю. — Міжнародна організація стандартизації, 2018.
20. Національна комісія з регулювання енергетики України. Погляд на впровадження смарт грид в Україні. — 2023. — URL: <https://www.nerc.gov.ua> (Дата звернення: 5 жовтня 2024).
21. Смарт грид і його вплив на енергетичний сектор // Енергетична Україна. — URL: <https://www.energyukraine.com> (Дата звернення: 10 жовтня 2024).