
КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.1>

SMART ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ АВАРІЙНИХ СТАНІВ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ МІСТ

Зайцев Є. О. – доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Інституту електродинаміки Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0003-3303-471X

Антоненко А. В. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерної інженерії
Державного університету телекомунікацій
ORCID ID: 0000-0001-9397-1209

Березниченко В. О. – молодший науковий співробітник
Інституту електродинаміки Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-9961-1703

Закусило С. А. – аспірант
Інституту електродинаміки Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-9193-8920

У статті показано, що розвиток інформаційні технології мають істотний вплив на існуючі розподільчі електричні мережі Smart міст забезпечуючи обмін інформацією на всіх технологічних сферах та всіма об'єктами енергетичної мережі згідно концепції Smart Grid. Зазначено, що забезпечення ефективності функціонування розподільчої системи Smart міст передбачає вирішення проблем сумісності між всіма об'єктами енергетичної мережі, шляхом використання ряду інтелектуальних пристроїв та супутніх інформаційних технологій. Однією із задач забезпечення ефективності електричних мереж є підвищення рівня моніторингу аварійних станів та надійності електропостачання споживачів за рахунок покращення ефективності роботи операторів систем розподілення. Показано, що одним із шляхів підвищення ефективності є використання засобів ідентифікації аварійних станів на ділянках як кабельних, так і повітряних електричних мереж. Наведено

схему розміщення індикаторів пошкоджень на ділянці розподільної електричної мережі, яка дозволяє визначити напрямок пошуку місця пошкодження. Зазначено, що поєднання інформаційно-комунікаційних технологій та засобів контролю й обліку електроенергії дозволяє створити сучасні Smart засоби ідентифікації аварійних станів для структур комунікаційно-інженерних та енергетичних мереж згідно концепції Smart City джерелом інформації в яких є вимірювальні трансформатори струму. Проведено порівняльний аналіз вимірювальних трансформаторів струму оптичного та електромагнітного типу. Показано, що значна кількість переваг оптичних вимірювальних трансформаторів струму, які можуть використовуватися в індикаторах пошкоджень можуть забезпечуватися вимірювальними трансформаторами струму електромагнітного типу. Створено блок-схему спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи з індикатором пошкоджень з урахуванням вимог концепції Smart Grid, яка дозволяє знизити час пошуку причини до мінімуму.

Ключові слова: smart мережі, ідентифікація, аварійні стани, розподільні мережі, електрична енергія, четверта промислова революція, розумні міста.

Zaitsev Ye. O., Antonenko A. V., Bereznychenko V. O., Zakusilo S. A. Smart means of determining emergency conditions in city electrical distribution networks

In this paper, shows that the development of information technologies has a significant impact on the existing electrical distribution networks of Smart cities, ensuring the exchange of information in all technological areas and all objects of the energy network according to the Smart Grid concept. Ensuring the efficiency of the functioning of the distribution system of Smart cities involves solving compatibility problems between all objects of the energy network using a number of smart devices and related information technologies was shown. One of the tasks of ensuring the efficiency of electric networks is to increase the level of monitoring of emergency situations and the reliability of electricity supply to consumers due to the improvement of the efficiency of distribution system operators. One of the ways to increase efficiency is the use of means of identifying emergency conditions in sections of both cable and overhead electrical networks. The diagram of the placement of damage indicators on the section of the electrical distribution network, which allows determining the direction of the search for the place of damage, is given. Combination of information and communication technologies and means of control and accounting of electricity allows creating modern Smart means of identifying emergency conditions for the structures of communication and engineering and energy networks according to the concept of Smart City, in which the source of information is measuring current transformers. For optical and electromagnetic current measuring transformers a comparative analysis conducted. A significant number of advantages of optical measuring current transformers that be used in damage indicators can be provided by measuring current transformers of the electromagnetic type are shown. A block diagram of a specialized information and measurement system with a damage indicator created, taking into account the Smart Grid concept requirements that allows reducing the searching time for the cause to a minimum.

Key words: smart networks, identification, emergency situations, distribution networks, electrical energy, fourth industrial revolution, smart cities.

Вступ. Розвиток інфраструктури сучасних міст за концепцією Smart City «Розумне місто» [1] передбачає реорганізацію всіх сфер життєдіяльності міста, шляхом розробки та впровадження сучасних інформаційних Smart-технологій в структуру комунікаційно-інженерних та транспортних мереж.

Використання Smart-технологій для збору даних про споживання електроенергії або води, а також про рівень якості повітря у дедалі більшій кількості міст покращує міські послуги. Значну частину розподільних електричних мереж міст, із забудовою багатопверховими будинками, побудовано із використання кабелів ліній до 10кВ, які прокладаються як в ґрунті, так і в спеціалізованих кабельних спорудах, у тому числі, у коробах, каналах, у спеціальних лотках, а також в траншеях, кабельних естакадах та на підвісці. Однією із задач розвитку цих електричних мереж є підвищення рівня моніторингу на основі Smart засобів ідентифікації аварійних станів в розподільчих мережах [2], що дозволить реалізувати автоматизацію управління потоками енергії, регулювання режимів її перетоків та споживання електроенергії з планомірним використанням маневрених потужностей, а також забезпечити швидке і точне визначення місця пошкодження ліній

електропередачі з одночасним зменшенням транспортних витрат на обхід ліній електропередавання та мінімізацією загального часу організації ремонтно-відновлюваних робіт.

Постановка проблеми. Сьогодні одним із важливих напрямків розвитку електроенергетичної галузі як в світі, так і в Україні є удосконалення та побудова електроенергетичних мереж та систем згідно з концепцією Smart Grid. Однією із основних складових концепції Smart Grid є діагностування аварійних режимів електричних мереж та точна ідентифікація місць пошкоджень. Засоби ідентифікації аварійних станів на ділянках як кабельних, так і повітряних електричних мереж знаходять все більше розповсюдження в електричних мережах європейських країн. Використання систем діагностування аварійних станів в електричних мережах підвищує рівень роботи мережі за рахунок оперативного виділення фрагментів електричних мереж, на яких сталася аварія. Також, при цьому поліпшуються показники надійності електропостачання внаслідок зменшення часу пошуку пошкодженої ділянки електричної мережі. Зокрема, виділено такі показники надійності функціонування електричних мереж, як SAIDI та ENS, значення яких поліпшуються з використанням систем ідентифікації аварійних станів на ділянках електричних мереж. А з огляду на впровадження в Україні RAB-регулювання, як методу тарифоутворення, який дозволяє розвивати і модернізувати інфраструктуру, у операторів систем розподілення з'являються можливості та стимули до підвищення надійності електропостачання споживачів електричної енергії.

Мета дослідження. *Метою роботи є дослідження можливості використання сучасних Smart технологій для зниження незапланованих перерв в електропостачанні споживачам, шляхом мінімізації часу визначення і пошуку пошкодженої ділянки в розподільних електричних мережах Smart міст за допомогою використання Smart засобів ідентифікації аварійних станів в структурі мереж.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукове обґрунтування розробки та впровадження Smart засобів визначення аварійних станів в розподільних електричних мережах міст обумовлено необхідністю підвищення надійності електропостачання споживачів та ефективності роботи операторів систем розподілення за рахунок пошуку пошкоджених ділянок в розподільних електричних мережах, які характеризуються як наявністю кількох фідерів на шинах підстанції, так і великою кількістю розгалужень. Одним із напрямків підвищення надійності та ефективності електропостачання в розподільних мережах є встановлення спеціалізованих індикаторів пошкоджень (вимірювачів експлуатаційних параметрів), які є складовою системи Smart Grid.

Значний внесок у розвиток засобів визначення стану ліній електропередавання за аварійними параметрами зробили: Барзилович В.М., Бачурин Н.І., Кутявин І.Д., Дроздов А.Д., Казанський В.Є., Вишневський А., Сирота І.М., Стогній Б.С., Танкевич Є.М., Кириленко О.В. та інші вітчизняні та зарубіжні учені[1-19].

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні в Україні активно реалізуються процеси впровадження в сферу електроенергетики нових інформаційних технологій, які мають істотний вплив на розподільчі електричні мережі, переводячи їх на новий якісний рівень розвитку і функціонування згідно концепції Smart Grid [3,4]. Як правило, Smart Grid розглядається, як розвиток існуючих електричних мереж з одночасним врахуванням концепції Smart City висуває нові вимоги до розробки сучасних компонентів автоматизованих систем керування, моніторингу та ідентифікації аварійних станів в розподільних електричних мережах міст. Таким вимогам відповідає повністю оптимізована електроенергетична

система розроблена Smart Grid Coordination Group [5], яка враховує всі технологічні сфери включені до Smart Grid наведена на рисунку 1.

Інформаційно-комунікаційні технології охоплює великі масштаби впровадження та використання у всіх технологічних сферах забезпечуючи обмін інформацією між зацікавленими сторонами та ефективне використання й управління всіма об'єктами енергетичної мережі.

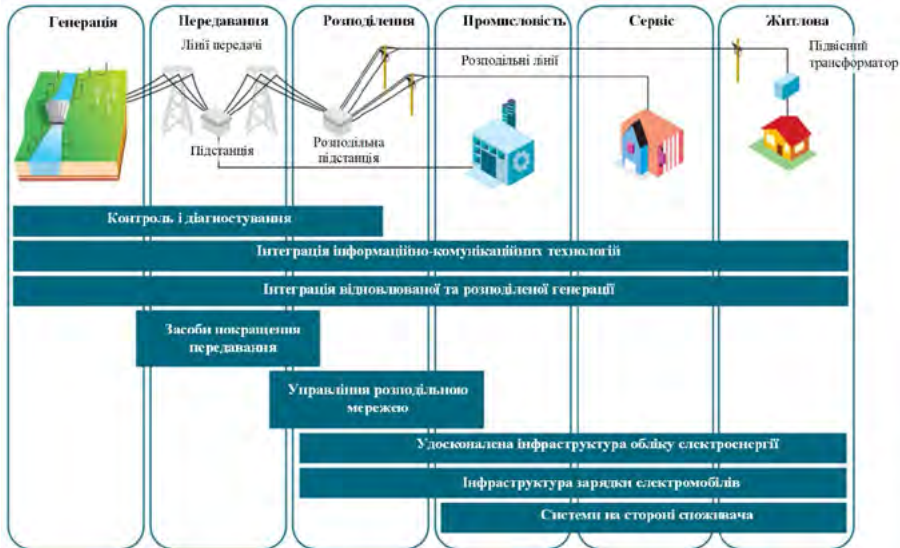


Рис. 1. Технологічні сфери Smart grid

Поєднання сенсорних технологій, таких як Smart засобів ідентифікації аварійних станів [2] в структурі мереж та інформаційно-комунікаційних технологій дозволяє забезпечити підвищення надійності електропостачання споживачів за рахунок забезпечення покращення ефективності роботи операторів систем розподілення [6]. У цьому разі ефективним способом підвищення надійності електропостачання споживачів в розподіленій мережі є використання індикаторів пошкоджень [7-9]. Використання індикаторів пошкоджень сумісно із засобами інформаційно-комунікаційних технологій дозволяє знизити час усунення причини виникнення аварійної ситуації до мінімуму, за рахунок негайної ідентифікації аварійної ділянки і здійснення оперативних дій щодо усунення причин виникнення аварійної ситуації. Типова структура системи моніторингу аварійних станів за концепцією Smart Grid наведена на рисунку 2.

У цьому разі для орієнтування та визначення місця пошкодження доцільним є розташування індикаторів пошкоджень [10] в місцях розгалуження розподільчої мережі. Таким чином встановлені індикатори об'єднуються в єдину мережу утворюючи системи моніторингу аварійних станів, яка дозволяє доволі точно визначити ушкоджену ділянку, фіксуючи факт протікання струму короткого замикання. Визначення ушкодженої ділянки може базуватися на різних методах виявлення однофазних замикання на землю DESIR (вибіркове виявлення з використанням залишкових струмів) і DDA (диференціальне виявлення з використанням провідності фаза-земля) [11-14]. Ці алгоритми базуються на обчисленні та моніторингу опорів кожної фази та фідера, часткової залишкової напруги нейтралі, відносних

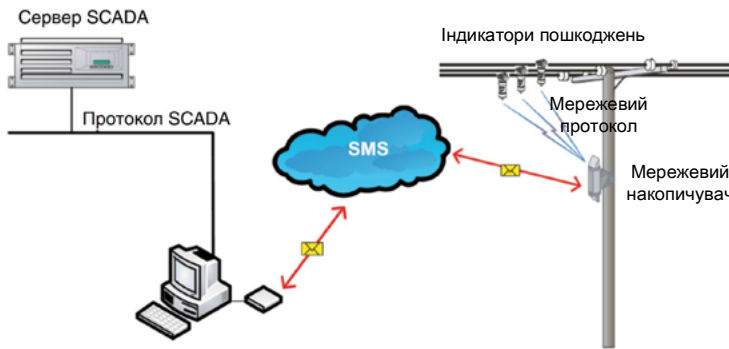


Рис. 2. Структура системи моніторингу аварійних станів за концепцією Smart Grid

варіацій асиметрії лінії та фази [15; 16], на зміні напруги нейтралі та струмів нульової послідовності [17]. Однак ці алгоритми мають недолік, який виникає в наслідок необхідності адаптації алгоритмів до особливостей мереж з ізольованою нейтраллю [18].

На рис. 3 наведено приклад місцями розміщення індикаторів пошкоджень на ділянці розподільної електричної мережі.

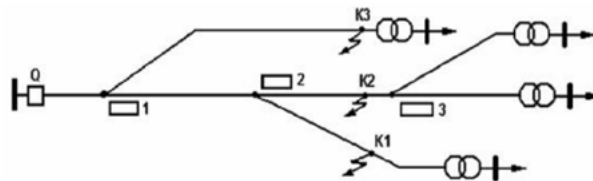


Рис. 3. Розміщення індикаторів пошкоджень ділянки розподільної електричної мережі

Для орієнтування при пошуку місця пошкодження в місцях розгалуження мережі встановлюються показчики ушкодженої ділянки, що фіксують факт протікання струму короткого замикання. По показам показчиків 1, 2 і 3 експлуатаційний персонал правильно визначає напрямок пошуку місця пошкодження. Зокрема, при замиканні в точці K1 факт протікання струму короткого замикання буде зафіксований тільки показчиком 1.

Найпростішим варіантом індикаторів пошкоджень є пристрої, які фіксують перевищення певного порогу струму короткого замикання вимірювальним трансформатором (ВТ). Визначення відстані до аварійної ділянки здійснюються за відомими розрахунковими параметрами мережі, а саме за значеннями напруги в мережі та значенням перехідного опору в місці пошкодження. Зазвичай на розподільчих лініях зазначені індикатори визначення відстані до місця ушкодження малоефективні через кілька відгалужень, що обумовлено малими значеннями струмів замикань та протяжністю електричних мереж. Ця проблема вирішується встановленням індикаторів пошкоджень на початку відгалужень кожної лінії. У цьому разі поєднуючи інформацію про відстань до місця аварії з інформацією від індикаторів пошкоджень, отримується точне місце знаходження пошкодженої ділянки мережі. Недоліками таких пристроїв є необхідність проведення

додаткових розрахунків та використання ВТ електромагнітного типу. Використання ВТ в багатьох випадках пов'язано з труднощами в їхній реалізації та забезпечення експлуатації в умовах континентального клімату на території України, який характеризується спекотним літом та морозною зимою із значними ризиками перепадами температур. Такого недоліка позбавлені інформаційно-вимірвальні системи з оптичними індикаторами пошкоджень [19]. Принцип дії оптичних індикаторів базується на використанні електро- і магнітооптичного ефектів. Використання стабільності прояву фізичного ефекту впливу магнітного чи електричного полів, які виникають під дією вимірюваних струму чи напруги на параметр оптичного випромінювання дозволяють забезпечити високу точність вимірювання струмів і напруг. Перетворення вимірюваних електричних величин на параметр оптичного випромінювання відбувається безпосередньо в зоні високої напруги, далі використовуючи оптичні канали зв'язку вимірвальна інформація з зони високої напруги передається на низьковольтну частину ІВС розміщену в безпечній зоні. Безпосередньо вимірюваною величиною при використанні електро- і магнітооптичного ефектів є параметр оптичного випромінювання, вимірювання яких може проводитися з високою точністю [9]. Отримані результати не залежать від зовнішніх метеорологічних факторів. Основною перевагою оптичних індикаторами пошкоджень є широка смуга пропускання сигналу, висока стійкість до перешкод, довговічність, стабільність та простота виконання оптичного елемента, а також можливість визначення дуже коротких значень струмів короткого замикання у діапазоні до мілісекунд. Такі значення струмів короткого замикання виникають у випадках короткого замикання на землю наприклад під час виникнення замикання фази на землю або на нейтральний провід під дією природніх стихій. Суттєвим недоліком оптичних індикаторами пошкоджень є висока вартість оптичних індикаторів пошкоджень, що пов'язано з рядом причин [20; 21] :

- високою вартістю технології виготовлення оптичних елементів та засобів вимірювання їх вихідних величин;
- незначна потужність вихідних кіл, що недостатня для приведення в дію існуючих комплектів електромеханічних захистів, і необхідність для її підвищення використання додаткових апаратних засобів;
- відсутність у терміналів захистів і приладів обліку, що випускаються вітчизняними та багатьма зарубіжними виробниками, відповідних входів для підключення оптичних перетворювачів;
- відсутність національних стандартів, які регламентують перевірку та визначення класу точності оптичних сенсорів та перетворювачів в цілому;
- відсутність достатньої кількості статистичних даних по використанню даних пристроїв, що значно затрудняє визначення їх надійності;
- велика вартість проєктів з огляду на високу вартість перетворюючих пристроїв і мережевого устаткування, а також організацію ланцюгів струму і напруги в цифровому вигляді.

Оскільки значна кількість переваг оптичними індикаторами пошкоджень можуть забезпечуватися традиційними ВТ струму, тому найбільш ефективним є побудова та використання індикаторів пошкоджень, що базуються на вимірюванні магнітного поля, індукованого струмом в мережі ВТ струму. Принцип роботи таких індикаторів полягає в тому, що сигнал з вторинної обмотки ВТ струму є пропорційним первинному індукованому струму та зсунутий відносно нього на кут по фазі, який близький нулю.

Існуючі індикаторами пошкоджень на основі ВТ струму через особливості їх конструкцій та забезпечення можливості нагляду за ними під час експлуатації та мінімізації похибки вимірювань встановлюються здебільшого тільки в великих вузлах генерування й розподілу електричної енергії, таких як станції і підстанції. Причому, ВТ зазвичай є складовою частиною закритих і відкритих розподільчих пристроїв. Крім зазначених обмежень на місце розміщення, їх недоліком є довготривалий час монтажу, наладки та необхідність зняття напруги під час їх встановлення й обслуговування.

Для забезпечення створення індикатора пошкоджень, який дозволяє знизити час пошуку причини та місця виникнення аварійної ситуації до мінімуму, а також забезпечити підключення до діючих повітряних та кабельних ліній без зняття напруги шляхом підключення виходу вторинної обмотки ВТ струму роз'ємної конструкції до вимірювальних перетворювачів безпосередньо розміщених біля ВТ струму за допомогою механічного пружинного кріплення розроблена схема підключення трансформатора струму (рис. 4). На рисунку 4 наведено наступні позначення: сенсор струму навантаження (ССН) та вимірювальної системи (ВС). ССН у своєму складі містить: неінвазивний сенсор струму, який складається з індуктивного трансформатора струму з розбірним осердям (1), опору, який призначений для перетворення значення струму в напругу (2), стабілізатора опорної напруги зсуву, реалізованому на аналогових елементах (3). ВС у своєму складі містить: мікроконтролер «АТmega328» (4), мікросхему перетворювача інтерфейсів (5), рідкокристалічний дисплей 2x16 символів (6) для забезпечення відображення інформації у разі необхідності, світлодіод (9) призначений для світової індикації нормальної та аварійної ситуації на ЛЕП. ССН та ВС разом із персональним комп'ютером (7) або іншим спеціалізованим засобом обробки інформації, на якому розміщено спеціалізоване програмне забезпечення утворюють ІВС контролю та моніторингу аварійних параметрів ЛЕП розподілених електричних мережах. Персональний комп'ютер (7) розташовується в диспетчерському центрі у разі дистанційного доступу до ССН або в безпосередній близькості до ССН у безпечній зоні.

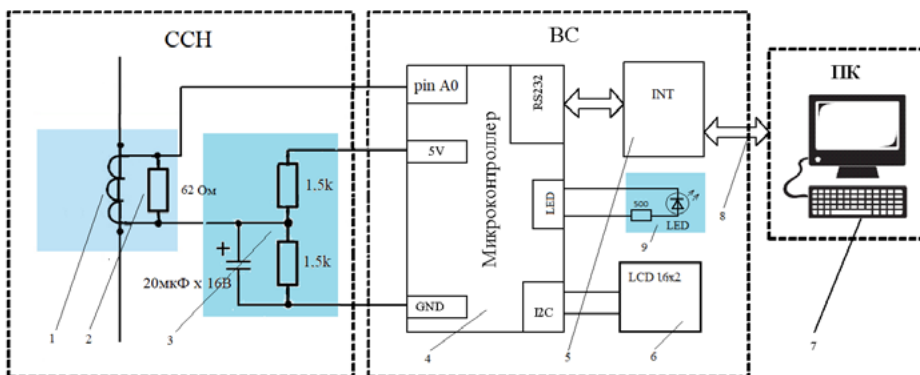


Рис. 4. Блок-схема

Дані зібрані із вимірювальних перетворювачів індикаторів ССН передаються на мережеву частину ІВС. Використовуючи отримані дані за допомогою блоку 7 можливо забезпечити моніторинг величини електричного струму, розпізнання причини різкого зросту сили струму: підключення нового навантаження чи появи струму КЗ, а при веденні додаткових коефіцієнтів визначати орієнтовну кількість

спожитої (відпущеної) електроенергії в секторі розподіленої мережі та легко перелаштовуватися з урахуванням можливих пікових навантажень у відгалуженні. Кожний індикатор задля забезпечення візуальної індикації стану ліній оснащується світлодіодом 9, у випадку нормальної роботи лінії світлодіод неперервно світиться зеленим кольором, у випадку аварійного стану світлодіод переходить у режим кодового світіння червоним кольором. Тип кодового світіння визначається типом аварійної ситуації на лінії.

Використання індикаторів ССН, що мають засоби зв'язку та передачі інформації (блок 5 та 8), забезпечують зниження час пошуку аварії до мінімуму. У випадку появи пошкодження індикатори ССН, встановлені на пошкоджених ділянках між центром живлення та місцем пошкодження, відправляють відповідні сигнали до диспетчерського центру, що дозволяє негайно ідентифікувати аварійну ділянку та здійснити оперативні дії, щодо усунення аварійної ситуації.

Висновки. Доведено, що інтеграція сенсорних та інформаційно-комунікаційних технологій дозволяє забезпечити створення ефективних Smart засобів ідентифікації аварійних станів розподільних електричних мереж. Проведені дослідження дозволили розробити структуру систем моніторингу, використання якої дозволяє забезпечити реорганізації існуючих електричних мереж у відповідності до положень концепцій Smart City, а також підвищити надійність електропостачання споживачів та отримати позитивний економічний ефект внаслідок скорочення перерв у їх електропостачанні, мінімізації загального часу організації ремонтно-відновлюваних робіт та зменшення транспортних витрати під час пошуку місць пошкоджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Розробляється проєкт концепції Smart City. URL: <https://auc.org.ua/novyna/rozroblyayetsya-proyekt-konceptsiyi-smart-city>
2. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., Щербань А.П. Засоби ідентифікації аварійних станів в розподільних мережах ОЕС України. *Приладобудування: стан і перспективи* : Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції, 17–18 травня 2022 р. м. Київ, Україна, С.265–267.
3. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / Під заг. ред. Акад. НАН України Кириленко О.В. К. : Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
4. Baranov G., Komisarenko O., Zaitsev I.O., Chernytska I. SMART technologies for transport tests networks, exploitation and repair tools. In Proc. of the International Conference Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). 25–27, March 2021, Pichanur (India), 2021. pp. 621–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396055>
5. SGCG/M490/G Smart Grid Set of Standards Version 3.1 // CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2014. p. 259. URL: https://www.cenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN-CENELEC_Topics/SmartGridsandMeters/SmartGrids/1_sgcg_standards_report.pdf
6. Зайцев Є. О., Акімов Д. Д., Миронов Д. О., Нефьодова А. О., Руських Ю. О. Інформаційні технології в системах діагностування та контролю технічного стану енергетичного обладнання. *Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій* : Наукові праці четвертої міжнар. наук.-практ. конф., 1–2 лютого 2022 р. (Київ, Україна), Київ: НУХТ, 2022. С. 211.
7. Łowczowski K., Olejnik B. Monitoring, detection and locating of transient earth fault using zero-sequence current and cable screen earthing current in medium voltage cable and mixed feeders. *Energies* 2022, 15, 1066. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15031066>
8. Roberts J., Altuve H.J., Hou D. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems; SEL: Pullman, WA, USA, 2005

9. Listyuhin V.A., Pecherskaya E.A., Timokhina O.A., Smogunov V.V. System for monitoring the parameters of overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series* 2086 (2021) 012059 DOI:10.1088/1742-6596/2086/1/012059
10. Егорова О.Ю., Егоров О.Б., Карова Т.А. Порівняльний аналіз методів визначення місця пошкодження ПЛЕП. *Системи озброєння і військова техніка*. 2009. № 2. С. 141-144. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2009_2_36.
11. Griffel D., Leitloff V., Harmand Y., Bergeal J., A new deal for safety and quality on MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1997. Vol. 12, №. 4. pp. 1428–1433.
12. Welfonder T., Leitloff V., Fenillet R., Vitet S. Location strategies and evaluation of detection algorithms for earth faults in compensated MV distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2000. Vol. 15, №. 4. pp. 1121–1128.
13. Leitloff V., Feuille R., Griffel D. Detection of resistive single-phase earth faults in a compensated power-distribution system. *European Transactions on Electrical Power*. 1997. Vol. 7, no. 1, pp. 65–73.
14. Zamora I., Mazon A.J., Sagastabeitia K.J., Zamora J.J. New method for detecting low current faults in electrical distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22. no. 4, pp. 2072–2079.
15. Ruz F., Quijano A., Gomez E. DSTRP: a new algorithm for high impedance fault detection in compensated neutral grounded M.V. power systems. *European Transactions on Electrical Power*. 2003. Vol. 13. no. 1. pp. 23–28.
16. Sagastabeitia K. J., Zamora I., MazOn A. J., Aginako Z., Buigues G. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase earth faults in compensated MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011. Vol. 26, no. 4. pp. 2251–2258.
17. Hanninen S., Lehtonen M., Pulkkinen U. A probabilistic method for detection and location of very high resistive earth faults. *Electric Power Systems Research*. Vol. 54, no. 3. pp. 199–206. 2000.
18. Sagastabeitia K. J., Zamora I., Mazon A. J., Aginako Z., Buigues G. Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Vol. 6, no. 12. pp. 1252–1261. 2012
19. Listyuhin V.A., Pecherskaya E.A., Timokhina O.A., Smogunov V.V. System for monitoring the parameters of overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series* 2086 (2021) 012059 DOI:10.1088/1742-6596/2086/1/012059
20. Танкевич С.Є. Адаптивні вимірювальні перетворювачі струму та напруги для високовольних електроенергетичних об'єктів : дис ... канд. техн. наук: 05.14.02. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 171 с.
21. Зайцев Є.О. Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів : дис. ... докт. техн. наук: 05.13.05. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2020. 424 с.

REFERENCES:

1. The Smart City concept project is being developed. URL: <https://auc.org.ua/novyna/rozroblyayetsya-proyekt-koncepciyi-smart-city>
2. Zaitsev I.O., Berezhnychenko V.O., Shcherban A.P. (2022) Means of identification of emergency conditions in the distribution networks of UES of Ukraine. Instrumentation: state and prospects: Materials of the XXI International Scientific and Technical Conference, May 17–18, Kyiv, Ukraine, P. 265-267.
3. Intelligent electrical networks: elements and modes. Under general Ed. Acad. National Academy of Sciences of Ukraine O.V. Kyrlyenko: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 p.
4. Baranov G., Komisarenko O., Zaitsev I.O., Chernytska I. (2021) SMART technologies for transport tests networks, exploitation and repair tools. In Proc. of the International Conference Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). 25-27, March 2021, Pichanur (India), pp. 621-625. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396055>
5. SGCG/M490/G_Smart Grid Set of Standards Version 3.1 // CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2014. p. 259. URL: <https://www.cenelec>

eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN-CENELEC_Topics/Smart Grids and Meters/Smart Grids/1_sgcg_standards_report.pdf

6. Zaitsev I.O., Akimov D.D., Myronov D.O., Nefiodova A.O., Ruskykh Yu.O. (2022) Information technologies in systems for diagnosing and monitoring the technical condition of power equipment. Modern trends in the development of information systems and telecommunication technologies: Scientific works of the fourth international science and practice conference, February 1–2, 2022 (Kyiv, Ukraine), Kyiv: NUHT, P. 211.

7. Łowczowski K., Olejnik B. (2022) Monitoring, detection and locating of transient earth fault using zero-sequence current and cable screen earthing current in medium voltage cable and mixed feeders. *Energies*, 15, 1066. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15031066>

8. Roberts J., Altuve H.J., Hou D. (2005) Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems; SEL: Pullman, WA, USA.

9. Listyuhin V.A., Pecherskaya E.A., Timokhina O.A., Smogunov V.V. System for monitoring the parameters of overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series* 2086 (2021) 012059 DOI:10.1088/1742-6596/2086/1/012059

10. Egorova O. Yu., Egorov O.B., Karova T.A. (2009) Comparative analysis of methods for determining the place of damage to the PLEP. *Weapon systems and military equipment*. No. 2. P. 141-144. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2009_2_36.

11. Griffel D., Leitloff V., Harmand Y., Bergeal J. (1997) A new deal for safety and quality on MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 12, №. 4. pp. 1428–1433.

12. Welfonder T., Leitloff V., Fenillet R., Vitet S. (2000) Location strategies and evaluation of detection algorithms for earth faults in compensated MV distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 15, №. 4. pp. 1121–1128.

13. Leitloff V., Feuille R., Griffel D. (1997) Detection of resistive single-phase earth faults in a compensated power-distribution system. *European Transactions on Electrical Power*. Vol. 7, no. 1, pp. 65–73.

14. Zamora I., Mazon A.J., Sagastabeitia K.J., Zamora J.J. (2007) New method for detecting low current faults in electrical distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 22. no. 4, pp. 2072–2079.

15. Ruz F., Quijano A., Gomez E. (2003) DSTRP: a new algorithm for high impedance fault detection in compensated neutral grounded M.V. power systems. *European Transactions on Electrical Power*. Vol. 13. no. 1. pp. 23–28.

16. Sagastabeitia K. J., Zamora I., Mazon A. J., Aginako Z., Buigues G. (2011) Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase earth faults in compensated MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 26, no. 4. pp. 2251–2258.

17. Hanninen S., Lehtonen M., Pulkkinen U. (2000) A probabilistic method for detection and location of very high resistive earth faults. *Electric Power Systems Research*. Vol. 54, no. 3. pp. 199–206.

18. Sagastabeitia K. J., Zamora I., Mazon A. J., Aginako Z., Buigues G. (2012) Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Vol. 6, no. 12. pp. 1252–1261.

19. Listyuhin V.A., Pecherskaya E.A., Timokhina O.A., Smogunov V.V. System for monitoring the parameters of overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series* 2086 (2021) 012059 DOI:10.1088/1742-6596/2086/1/012059

20. Tankevich S.E. (2011) Adaptive current and voltage measuring converters for high-voltage electric power facilities: dissertation candidate. technical Sciences: 05.14.02. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 171 p.

21. Zaitsev I.O. (2020) Development of the theory and practical implementation of optoelectronic systems for diagnosing mechanical parameters of powerful turbo- and hydrogen generators: dissertation ... doc. technical Sciences: 05.13.05. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 424 p.