

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**ТКАЧ ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ**



УДК 621.31:621.314.223

**СИСТЕМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ МІСЦЬ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ  
НА ЗЕМЛЮ У ПОВІТРЯНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ  
З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Чернігів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Чернігівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Буйний Роман Олександрович**,  
Національний університет «Чернігівська політехніка»,  
доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Тугай Юрій Іванович**,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
завідувач відділу оптимізації систем електропостачання;

кандидат технічних наук, доцент,  
**Гай Олександр Валентинович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
доцент кафедри електропостачання ім. В.М. Синькова.

Захист дисертації відбудеться “23” вересня 2021 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К79.051.03 при Національному університеті «Чернігівська політехніка» за адресою: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Чернігівська політехніка» за адресою: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, Україна.

Автореферат розіслано “20” серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради К79.051.03



В.П. Войтенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В даний час в діючих системах розподілу електроенергії України та ближнього зарубіжжя для забезпечення безперебійності в роботі під час однофазних замикань на землю (ОЗЗ) для розподільних електричних мереж (ЕМ) 6-10 кВ використовують режим ізольованої нейтралі. Однак при таких пошкодженнях в мережах з ізольованою нейтралю напруга у пошкодженій фазі, в залежності від перехідного опору у місці замикання, прагне до нуля, а напруга у двох інших фазах – зростає до лінійної. Це збільшує ймовірності утворення міжфазного короткого замикання через землю, що призводить до знеструмлення споживачів на час пошуку та ліквідації пошкодження. Друга фаза, у якій відбувається ОЗЗ, може виявитися на іншому електричнозв'язаному фідері, через що будуть знеструмлені відразу два приєднання. Проте пошук точного місця пошкодження виконується силами оперативно-виїзної бригади (ОВБ).

В даний час найпоширенішими є методи пошуку, які базуються на аналізі ОВБ електромагнітного поля вздовж траси повітряної лінії (ПЛ). При значній її протяжності пошук ОЗЗ може зайняти багато часу. Тому пошук місця ОЗЗ є достатньо довгим і затратним. За весь період пошуку мережа буде працювати у ненормальному режимі. Для зменшення часу пошуку ОЗЗ та ймовірності утворення міжфазних замикань використовують прилади, що дозволяють виявити місце пошкодження та передати на диспетчерський пункт.

Однак існуючі пристрої дозволяють лише звузити зону пошуку до виявленого відгалуження від магістралі ПЛ, а пошкодження повинно бути знайдене «традиційним» способом пошуку під час обходу персоналом ОВБ лінії електропередавання та візуального контролю.

Найбільш вагомий внесок у вирішення задач, пов'язаних з пошуком місць пошкоджень в ЕМ внесли відомі науковці і фахівці: Гребченко М.В., Кутін В.М., Сабадаш І.О., Стасенко Р.Ф., Стогній Б.С., Черемісін М.М., Феценко П.П. та інші.

Тому створення інноваційного методу визначення місця однофазного замикання на землю, що дозволить визначати місце пошкодження з точністю до опори ПЛ за мінімальний проміжок часу є актуальним. Це дозволить зменшити час усунення пошкодження та, як наслідок, зменшити ймовірність утворення міжфазного замикання, що, в свою чергу, мінімізує недовідпуск електричної енергії споживачам та зменшує експлуатаційні витрати.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, представлені в роботі, проводилися у Національному університеті «Чернігівська політехніка» згідно з законом України №2623-III від 11.07.2001 року «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки до 2020 року» за напрямком наукових досліджень «Технології електроенергетики» відповідно до постанови КМУ від 07.09.2011 №942 Міністерства освіти і науки України.

Наукові дослідження виконувалися в рамках роботи «Визначення місць однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю» (номер державної реєстрації 0118U006804), у якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є створення системи діагностики повітряних ЕМ з ізольованою нейтраллю задля автоматизації контролю штирьової ізоляції опор ПЛ, що зменшить час пошуку місця ОЗЗ, зменшить експлуатаційні витрати та недовідпуск електроенергії споживачам.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Виконати порівняльний аналіз існуючих систем діагностики стану ізоляції ПЛ.
2. Розробити схемотехнічні рішення пристрою ідентифікації місця ОЗЗ, за рахунок виміру струму замикання через штирьову ізоляцію на опорі та його живлення від даного струму без додаткового джерела живлення та без необхідності підкорочування непошкоджених фаз ЕМ задля збільшення струму замикання.
3. Розробити математичні моделі елементів блоку живлення пристрою задля оптимізації їх параметрів та побудови методів їх розрахунку.
4. Створити фізичну модель запропонованого пристрою ідентифікації місця ОЗЗ та експериментально перевірити справедливність отриманих теоретичних результатів роботи.
5. Розробити метод розрахунку показників надійності та ефективності ЕМ із запропонованими ідентифікаторами ОЗЗ для отримання апарату розрахунку доцільності використання запропонованої системи.

**Об'єктом дослідження** є енергетичні та електромагнітні процеси, що протікають в ЕМ з ізольованою нейтраллю, які оснащені системою ідентифікації місця ОЗЗ.

**Предметом дослідження** є параметри та характеристики системи ідентифікації місця ОЗЗ та їх вплив на показники надійності системи електропостачання.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених у дисертації задач використовувалась теорія електричних кіл, теорія подібності, положення фундаментальної теорії лінійних і нелінійних електротехнічних систем, математичне й фізичне моделювання. Математичне моделювання та розрахунки виконані у програмних пакетах Microsoft Excel, MathCAD, Maple.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертації особисто здобувачем отримані наступні наукові результати:

– вперше запропоновано спосіб ідентифікації ОЗЗ з живленням електроніки від струму замикання, що на відміну від існуючих не потребує експлуатаційних затрат та створення штучних коротких замикань, та дозволяє зменшити час пошуку місця пошкодження ізоляції та недовідпуск електроенергії споживачам.

– вперше отримано метод розрахунку потужності, яку можна відібрати від струму в місці ОЗЗ, що дозволяє оцінити час заряду накопичувача енергії для передачі інформації про місце пошкодження;

– отримав подальший розвиток метод розрахунку показників надійності та ефективності функціонування існуючих ЕМ з ідентифікатором ОЗЗ, запропонованим автором, що базується на методиці оцінки загального ефекту від функціонування ЕМ та дозволяє оцінити доцільність запропонованого способу ідентифікації однофазного замикання на землю.

### **Практичне значення отриманих результатів роботи:**

1. Запропоновані принципи технічної реалізації системи діагностики повітряних ЕМ з ізольованою нейтраллю задля автоматизації контролю стану штирьової ізоляції опор ПЛ.

2. Розроблено і виготовлено прототип пристрою ідентифікації ОЗЗ для опор ПЛ зі штирьовою ізоляцією, що не потребує окремого джерела живлення та дозволяє діагностувати пошкодження ізоляції навіть на ранніх стадіях.

Запропонована система ідентифікації може використовуватися операторами систем розподілу, що експлуатують ПЛ, задля поліпшення показників надійності електропостачання та зменшення недовідпуску електроенергії споживачам за рахунок зменшення часу усунення пошкодження.

Результати дослідження використовуються в навчальному процесі Національний університет «Чернігівська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Чернігів, Україна) для підготовки фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджено у ПрАТ «ДТЕК Київські регіональні електромережі» (м. Київ, Україна).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, викладені в дисертації, отримані здобувачем особисто.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особисто здобувачеві належить: в [1] – пропозиції щодо реалізації інноваційного підходу до визначення місці ОЗЗ, що виникають в ЕМ з ізольованою нейтраллю через їх штирьову ізоляцію та оцінка необхідної енергії для ємнісного накопичувача запропонованого пристрою; в [2] – функціональна схема запропонованого пристрою ідентифікації ОЗЗ в ЕМ з ізольованою нейтраллю та опис його встановлення до діючих ЕМ; в [3] – оцінка чутливості пристрою ідентифікації ОЗЗ до перехідного опору у місці пошкодження штирьової ізоляції; в [4] – аналіз та систематизація ретроспективної інформації по відмовам, які викликані ОЗЗ, в діючих ЕМ 6-10кВ; в [5] – пропозиції до впровадження запропонованого пристрою ідентифікації ОЗЗ до діючих ЕМ як елемента концепції Smart Grid в Україні; в [6] – оцінка ефективності запровадження запропонованого пристрою ідентифікації ОЗЗ за показниками надійності електропостачання споживачів за показниками SAIDI, SAIFI та ENS; в [7] – метод розрахунку показників надійності та ефективності функціонування існуючих ЕМ з ідентифікатором ОЗЗ; в [8] – аналітичні залежності для розрахунку потужності відбору від струму ОЗЗ в місці замикання; в [9] – пропозиції до інтеграції пристроїв ідентифікації ОЗЗ в SCADA-систему диспетчерського управління операторів систем розподілу електроенергії.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних, відомчих і вузівських науково-технічних конференціях та семінарах: Проблеми сучасної електротехніки. XV Міжнародна науково-технічна конференція ПСЕ-2018 (м. Київ, 4-8 червня 2018 року); Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених (Чернігів, ЧНТУ, 10-11 квітня 2019 року); 6th International Conference «Energy Smart Systems - 2019» (April 17-19, 2019 Kyiv, Ukraine, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute); Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем. III Міжнародна науково-технічна конференція (м. Харків, 12-15 листопада 2019 року); XI Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2021)» (м. Чернігів, 26-27 травня 2021 року, Національного університету "Чернігівська політехніка").

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень отримано 1 патент України на корисну модель, опубліковано 8 наукових праць, з яких 1 стаття у фаховому виданні України, віднесеного до категорії «А» та 3 статті у фахових виданнях України, віднесених до категорії «Б», 2 публікації включено до наукометричної бази даних «Scopus», 1 наукова праця опублікована у періодичному науковому виданні Європейського Союзу.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і 2-х додатків. Загальний обсяг дисертації становить 165 сторінок, 108 сторінок основного тексту, додатків – 33 сторінки. Дисертація містить 54 рисунка, 9 таблиць та посилання на 97 літературних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність дисертаційної роботи, наведено її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і задачі дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність роботи, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробації, публікації та використання результатів дослідження.

У першому розділі розглядається проблема підвищення надійності електропостачання споживачів в мережах середньої напруги.

Проаналізовані існуючі методи та засоби пошуку місці пошкодження на ПЛЛ 6-10кВ, що працюють в мережах з ізолюваною нейтраллю. Встановлено, що існуючі засоби дозволяють лише звузити зону пошуку до окремого відгалуження від магістралі ПЛЛ та не дозволяють визначати точне місце та тип пошкодження.

Проведено аналіз наукових публікацій та патентів, що пов'язані з вирішенням проблеми пошуку ОЗЗ, який показав, що дана проблема є недостатньо вирішеною, оскільки підходи, які пропонуються авторами цих робіт, є достатньо складними та не враховують другорядних факторів, які впливають на точність визначення місця

пошкодження. Встановлено, що технічні засоби, які їх реалізують, є дорогими та самі потребують значних експлуатаційних витрат.

У другому розділі проведено оцінку впливу пошкоджень в різних елементах ЕМ 6-10кВ операторів систем розподілу на показники надійності електропостачання. Оцінка проводилась за ретроспективними даними відмов за 2012-2017 роки по ПАТ «Чернігівобленерго».

Встановлено, що найбільші значення недовідпуску електричної енергії споживачам спостерігалися через пошкодження фазної штирової ізоляції (46%) та обривів проводу (24%). Обробка ретроспективних даних дозволила отримати розподіл загальної кількості знеструмлень, що віднесені до 1км ПЛ 6-10кВ, які викликані ОЗЗ по ЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» (рис. 1).

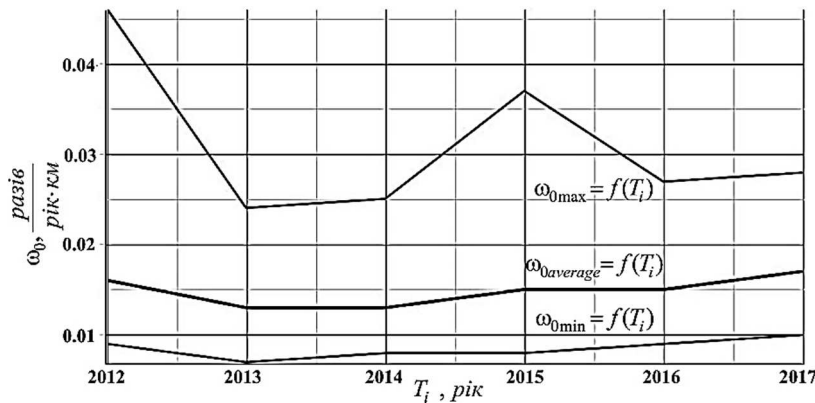


Рисунок 1 – Розподіл загальної кількості знеструмлень, що віднесені до 1км ПЛ 6-10кВ, які викликані ОЗЗ по ЕМ

статистика по ПАТ «Чернігівобленерго» показує, що, подекуди, час пошуку місця пошкодження може сягати і декількох діб. Це викликано тим, що більшість пошкоджень пов'язані із пробоем штирової ізоляції, які після утворення можуть самоусуватися, а потім знову виникати. Тому експлуатаційний персонал не встигає знайти такі пошкодження «традиційними» способами, що використовуються в експлуатації, що погіршує експлуатаційні показники надійності, приводячи, в деяких випадках, до переходу ОЗЗ у міжфазні замикання із подальшим знеструмленням споживачів електричної енергії.

Встановлено, що найбільший середньорічний недовідпуск електричної енергії спостерігається при пошкодженнях штирової ізоляції ПЛ 6-10 кВ і сягає 45,9% від загального середньорічного недовідпуску, а середнє значення тривалості одного знеструмлення, яке викликане тільки ОЗЗ – 1,2 год/(рік·відкл), що суттєво погіршує такий показник надійності електропостачання, як SAIDI. Слід зазначити, що за 2018 рік середнє значення показника SAIDI (який включає тривалості знеструмлень як під час ОЗЗ, так і під час міжфазних замикань) для країн ЄС склало 72,04 хвилини/рік, що значно менше показника для вітчизняних мереж на одне відключення під час ОЗЗ. Тому є потреба у розробці інноваційного способу, що дозволить визначити місце пошкодження з точністю до опори.

З рис. 1 видно, що середнє питомиє значення кількості знеструмлень через ОЗЗ по мережам ПАТ «Чернігівобленерго» є майже стабільним та знаходиться в діапазоні 0,013-0,017 разів/(рік·км). Згідно з діючих норм середня тривалість пошуку ОЗЗ в ЕМ 6-10кВ у більшості випадків не повинна перевищувати 2 години. Проте

Інноваційний спосіб ідентифікації ОЗЗ базується на використанні пристрою, запропонованого автором. Пристрій пропонується встановлювати на металевому спуску заземлення траверси кожної опори ПЛ (рис. 2).

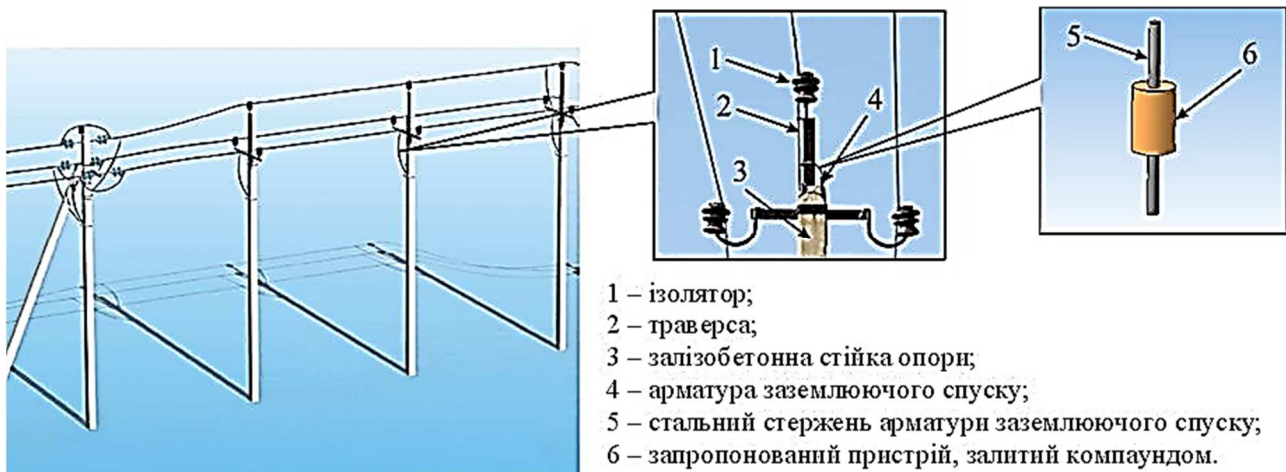


Рисунок 2 – Розміщення пристрою ідентифікації місця ОЗЗ в ЕМ 6-10кВ

У разі виникнення ОЗЗ через штирову ізоляцію на одній з опор ПЛ струм замикання буде протікати через ізолятор, траверсу та заземлюючий спуск у землю. Величина цього струму для вітчизняних ЕМ з ізолюваною нейтраллю напругою 6-10кВ знаходиться в межах 0,5 до 20 А. Даний струм також буде протікати через трансформатор струму запропонованого пристрою, який його ідентифікує і відправить повідомлення через мережу GSM на диспетчерський пункт. Запропонована структурна схема приладу для ідентифікації ОЗЗ наведена на рис. 3. Вона складається з трансформатора струму (ТС), блоку контролера заряду (БЗ), ємнісного накопичувача енергії (НЕ), ключа ввімкнення живлення (К), блоку живлення (БЖ), мікроконтролера (МК) та GSM-модуля зв'язку. У разі виникнення ОЗЗ через штирову ізоляцію, струм ОЗЗ буде протікати через первинну обмотку трансформатора струму (ТС). Він буде живити накопичувач енергії (НЕ) через блок контролеру заряду (БЗ). Таким чином при виникненні ОЗЗ в НЕ починає

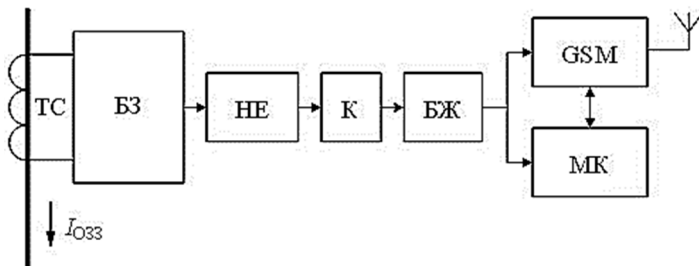


Рисунок 3 – Структурна схема запропонованого ідентифікатора ОЗЗ

відправляти повідомлення за допомогою GSM-модуля на диспетчерський пункт.

Перевагами такого підходу є: 1) відсутність акумулятора, що потребує обслуговування та є вразливим до від'ємних температур навколишнього середовища; 2) висока надійність через відсутність живлення пристрою в нормальному режимі роботи ЕМ; 3) визначення місця пошкодження з точністю до опори.



Доведена можливість живлення такого пристрою навіть від малих струмів ОЗЗ в ЕМ. Для цього запропонована аналітична математична модель трансформатора відбору потужності, за якою отримані вирази для знаходження діючого значення струму (1) та напруги (2) на виході трансформатора в залежності від конструктивних параметрів та навантаження:

$$I_{2rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_2(t)^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_m S \mu \mu_0 \omega w_1 w_2}{\sqrt{(w_2^2 \mu \mu_0 \omega S)^2 + R^2 l_{cp}^2}}, \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{I_m S \mu \mu_0 \omega w_1 w_2 R_H}{\sqrt{2(w_2^2 \mu \mu_0 \omega S)^2 + 2R^2 l_{cp}^2}}. \quad (2)$$

де  $T$  – період інтегрування;  $i_2(t)$  – миттєве значення струму в момент часу  $t$ ;  $I_m$  – амплітуда струму ОЗЗ в первинній обмотці;  $S$  – площа перерізу осердя магнітопроводу;  $\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу осердя;  $\mu_0$  – магнітна постійна;  $\omega$  – кутова частота струму;  $w_1, w_2$  – кількість витків у первинній та вторинній обмотках;  $R, R_H$  – загальний опір електричного кола та опір навантаження;  $l_{cp}$  – середня довжина магнітного шляху в магнітопроводі.

Для таких трансформаторів рекомендовано застосовувати аморфні та нанокристалічні сплави. На прикладі магнітопроводу МТ03215С-11-0026 з кількістю витків

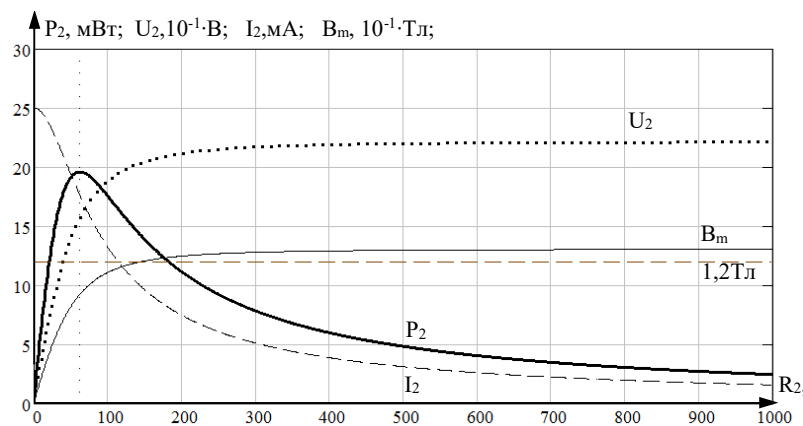


Рисунок 4 – Електричні параметри в залежності від навантаження за струму ОЗЗ у первинній обмотці 1,5А

вторинної обмотки 80 та первинної – 1, отримані характеристики напруги, струму та потужності на виході (рис. 4). З рис. 4 видно, що найбільшу потужність можна відібрати лише за певного вторинного навантаження. Тому для отримання найбільшої ефективності відбору потужності електроніка має підтримувати роботу біля точки максимуму вихідної потужності. Для оцінки потужності, що буде відбиратися від струму ОЗЗ, побудовані залежності потужності від струму навантаження при різних струмах ОЗЗ (рис. 5). Як видно з рисунку при мінімальному струмі ОЗЗ в 2А, що характерний для розгалужених ЕМ напругою 10кВ з ПЛ у сільській місцевості, середня потужність, що відбирається від струму ОЗЗ, складатиме ~15мВт.

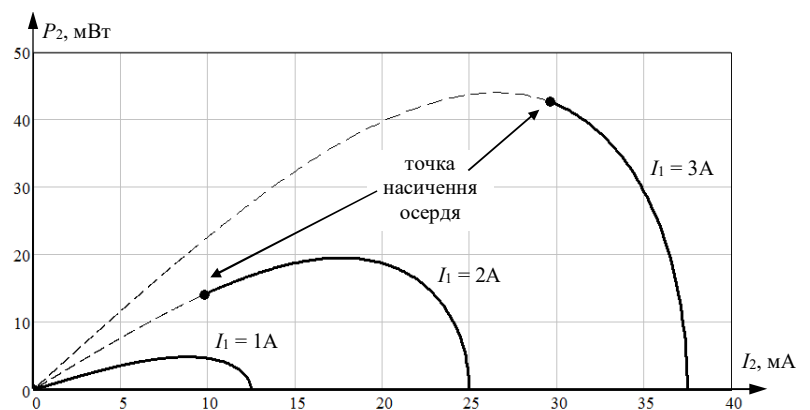


Рисунок 5 – Потужності, що відбирається від струму замикавання (за струмів ОЗЗ 1, 2 та 3 А)

У третьому розділі для визначення ефективності застосування запропонованого ідентифікатора місця ОЗЗ у існуючих розподільних ЕМ напругою 6-10 кВ створено математичну модель, яка враховує вплив ідентифікатора ОЗЗ на такі показники надійності електропостачання як:

- недовідпуск електричної енергії споживачам;
- тривалість відновлення електропостачання;
- середню тривалість роботи мережі без замикання на землю, яке може перейти у коротке замикання;
- індекси середньої частоти і тривалості перерв в електропостачанні.

Недовідпуск електроенергії споживачам у випадку відсутності в мережі ідентифікатора ОЗЗ можна розрахувати за формулою:

$$\Delta W = P \cdot (\omega_0^{(2,3)} \cdot \tau + \omega_0^{(1+1)} \cdot \tau + \gamma \cdot v_0 \cdot \eta) \cdot l_{\Sigma} = P \cdot (\theta_{\text{ав.міжф.}} + \theta_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}} + \theta_{\text{план.}}), \quad (3)$$

де  $P$  – середня потужність знеструмлених споживачів;  $\omega_0^{(2,3)}$  – погонна частота стійких відмов під час дво- та трифазних КЗ в ЕМ;  $\omega_0^{(1+1)}$  – погонна частота стійких відмов під час міжфазних КЗ в ЕМ, які утворюються під час переходу ОЗЗ в міжфазні замикання;  $\tau$  – середня тривалість відновлення електропостачання споживачам під час пошкодження;  $v_0$  – погонна частота планових відключень;  $\eta$  – середня тривалість обслуговування ЕМ при планових відключеннях;  $\gamma$  – коефіцієнт, що враховує менші наслідки від планових відключень у порівнянні з аварійними;  $l_{\Sigma}$  – сумарна довжина ПЛ в ЕМ 6-10 кВ;  $\theta_{\text{ав.міжф.}}$  – тривалість відновлення електропостачання споживачам при пошкодженнях, викликаних дво- та трифазними КЗ;  $\theta_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}}$  – тривалість відновлення електропостачання споживачам при пошкодженнях, викликаних переходом ОЗЗ у міжфазні КЗ;  $\theta_{\text{план}}$  – тривалість відновлення електропостачання споживачам при планових відключеннях споживачів.

Встановлення ідентифікатора ОЗЗ дозволить зменшити недовідпуск електричної енергії споживачам за рахунок зменшення частоти стійких відмов, викликаних переходом ОЗЗ у міжфазні замикання  $\omega_0^{(1+1)}$ .

Аналіз ретроспективної інформації по ПАТ «Чернігівобленерго» дозволив

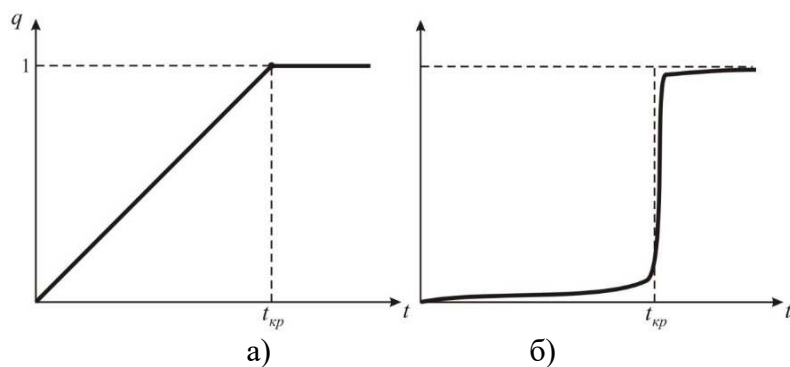


Рисунок 6 – Запропоновані закони розподілу ймовірності переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ

встановити, що перехід ОЗЗ у міжфазні КЗ може відбуватися двома шляхами:

– до деякого критичного часу  $t_{\text{кр}}$  ймовірність переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ  $q$  лінійно збільшується зі збільшенням часу (рис. 6, а);

– до деякого критичного часу  $t_{\text{кр}}$  ймовірність переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ  $q$  збільшується

несуттєво ( $q \rightarrow 0$ ), а після його досягнення різко зростає ( $q \rightarrow 1$ ) (рис. 6, б).

У першому випадку, коли до деякого критичного часу  $t_{кр}$  ймовірність переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ  $q$  лінійно збільшується зі збільшенням часу, математичне відображення закону розподілу матиме вигляд:

$$q = f(t) = \begin{cases} t/t_{кр}, & t < t_{кр}; \\ 1, & t \geq t_{кр}, \end{cases} \quad (4)$$

а у другому випадку, коли до деякого критичного часу  $t_{кр}$  ймовірність переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ  $q$  збільшується несуттєво, а після його досягнення різко зростає:

$$q = f(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{кр}; \\ 1, & t \geq t_{кр}. \end{cases} \quad (5)$$

Для ПАТ «Чернігівобленерго»  $t_{кр}$  знаходиться в діапазоні 0,75-2,05 год.

Тобто, у разі застосування ідентифікатора ОЗЗ у розподільних ЕМ напругою 6-10 кВ тривалість відновлення електропостачання споживачам  $\theta$  та недовідпуск електричної енергії споживачам  $\Delta W$  можуть бути зменшені на:

$$\delta\theta = \theta - \theta_{\text{идент.}} = \theta_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}} \cdot (1 - q), \quad (6)$$

$$\delta W = P \cdot \delta\theta = P \cdot \theta_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}} \cdot (1 - q). \quad (7)$$

Як правило, на етапі запровадження будь-яких засобів підвищення надійності, до яких також відноситься ідентифікатор ОЗЗ, запропонований автором, цікавляться не абсолютними, а відносними значеннями параметрів. Тому були отримані залежності, які дозволяють розрахувати відносне значення зниження тривалості відновлення електропостачання  $\delta\theta_{\%}$  та зниження недовідпуску електричної енергії споживачам  $\delta W_{\%}$ :

$$\delta W_{\%} = \delta\theta_{\%} = \frac{\alpha \cdot \omega_0 \cdot \tau \cdot (1 - q)}{\omega_0 \cdot \tau + \gamma \cdot \nu_0 \cdot \eta} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де  $\alpha$  – доля ООЗ, які переходять у міжфазні КЗ від загальної кількості КЗ;  $\omega_0$  – сумарна погонна частота стійких відмов.

Попередній аналіз статистичних даних по ПАТ «Чернігівобленерго» показав, що  $\gamma \cdot \nu_0 \cdot \eta \cdot \omega_0 \cdot \tau \approx 0,25$ , а  $\alpha = 0,4$ . Тому відносне значення зниження тривалості відновлення електропостачання  $\delta\theta_{\%}$  та зниження недовідпуску електричної енергії споживачам  $\delta W_{\%}$  для ПАТ «Чернігівобленерго» буде дорівнювати:

– за першого виду розподілу ймовірності переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ:

$$\delta W_{\%} = \delta\theta_{\%} \approx \begin{cases} 32 \cdot (1 - t/t_{кр}), & t < t_{кр}; \\ 0, & t \geq t_{кр}, \end{cases} \quad (9)$$

– за другого виду розподілу ймовірності переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ

$$\delta W_{\%} = \delta\theta_{\%} \approx \begin{cases} 32, & t < t_{кр}; \\ 0, & t \geq t_{кр}. \end{cases} \quad (10)$$

Аналіз величини струмів ОЗЗ в електричних мережах 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго», які отримують живлення від районних підстанцій 110(35)/10(6) кВ, де не передбачена їх компенсація, показав, що вони знаходяться в діапазоні 2,1-15,4 А. Для мінімального типового струму ОЗЗ ідентифікатор дозволяє визначати місце ОЗЗ протягом 10 хвилин. Чим більше струм ОЗЗ, тим менше час ідентифікації місця замикання. Тому з формул (9)-(10) випливає, що у випадку встановлення в електричну мережу ідентифікатора ОЗЗ, запропонованого автором, слід очікувати зниження тривалості відновлення електропостачання  $\delta\theta\%$  та недовідпуску електричної енергії споживачам  $\delta W\%$  на величину до 32%.

Для оцінки впливу ідентифікатора на середню тривалість роботи мережі без ОЗЗ, яке може перейти у КЗ  $T_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}}$  показано, що

– за першого виду розподілу (4) ймовірності переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ:

$$T_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}} = \int_0^{\infty} (1-q) \cdot dt = \int_0^{t_{\text{кр}}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{кр}}}\right) \cdot dt = \frac{t_{\text{кр}}}{2}, \quad (11)$$

– за другого виду розподілу (5)

$$T_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}} = \int_0^{\infty} (1-q) \cdot dt = \int_0^{t_{\text{кр}}} dt = t_{\text{кр}}. \quad (12)$$

Як правило величина деякого критичного часу  $t_{\text{кр}}$  має деякий розкид  $\Delta t$  відносно середнього значення, тому тривалість роботи мережі без ОЗЗ, яке може перейти у міжфазне замикання буде дорівнювати:

$$T_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}} = \begin{cases} t_{\text{кр}} / 2 \pm \Delta t & \text{– для першого виду розподілу;} \\ t_{\text{кр}} \pm \Delta t & \text{– для другого виду розподілу.} \end{cases} \quad (13)$$

Аналіз випадків утворення міжфазних замикань із ОЗЗ в розподільних електричних мережах 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» показав, що  $t_{\text{кр}} = 2,14 \pm 0,64$  год. Це дозволяє стверджувати, що середня тривалість роботи мережі без ОЗЗ, яке може перейти у міжфазне КЗ у найгіршому випадку (за першого закону розподілу) буде дорівнювати  $1,07 \pm 0,32$  год.

З вищезазначеного випливає, що тривалість ідентифікація ОЗЗ та час, протягом якого ОБВ добереться до місця замикання для його усунення не повинні разом перевищувати  $1,07 \pm 0,32$  год, що дозволить уникнути переходу ОЗЗ у міжфазне замикання. Оскільки точне місце ОЗЗ буде ідентифіковане запропонованим автором ідентифікатором та передане до SCADA- або ГІС-системи, то це дозволить диспетчерському персоналу зкоординувати ОБВ до місця пошкодження таким, чином щоб мінімізувати час.

Запропонована імітаційна модель пересування ОБВ до місця ОЗЗ у нерезервованій розподільній ЕМ напругою 6-10 кВ зображена на рис. 7.

Під час експлуатації ЕМ з ідентифікатором можуть виникнути задачі:

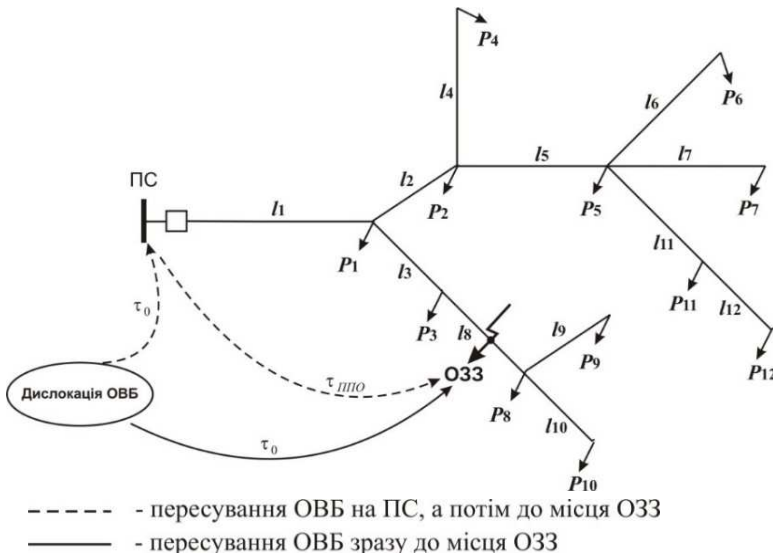


Рисунок 7 – Модель пересування ОВБ до місця ОЗЗ у розподільній ЕМ напругою 6-10 кВ

– визначення граничної відстані від місця дислокації ОВБ до місця утворення ОЗЗ  $L_{гр}$ , за якої при заданій швидкості пересування ОВБ ОЗЗ не встигне перейти у міжфазне КЗ;

– визначення мінімальної швидкості  $V_{a \min}$  пересування ОВБ, за якої може бути подолана задана відстань та ОЗЗ не встигне перейти у міжфазне КЗ.

буде мати вигляд:

$$L_{гр} = \begin{cases} (t_{кр} / 2 \pm \Delta t - \tau_{оч}) \cdot V_a / K_{кр} & \text{– для першого виду розподілу;} \\ (t_{кр} \pm \Delta t - \tau_{оч}) \cdot V_a / K_{кр} & \text{– для другого виду розподілу,} \end{cases} \quad (14)$$

а для другої:

$$V_{a \min} > \begin{cases} L_{пер} \cdot K_{кр} / (t_{кр} / 2 \pm \Delta t - \tau_{оч}) & \text{– для першого виду розподілу;} \\ L_{пер} \cdot K_{кр} / (t_{кр} \pm \Delta t - \tau_{оч}) & \text{– для другого виду розподілу,} \end{cases} \quad (15)$$

де  $L_{пер}$  – відстань від місця дислокації ОВБ до підстанції або місця утворення ОЗЗ, яку необхідно подолати ОВБ;  $K_{кр}$  – коефіцієнт кривизни дороги, який враховує збільшення відстані пересування ОВБ;  $V_a$  – швидкість пересування автомашини ОВБ;  $\tau_{оч}$  – час очікування готовності ОВБ до виїзду на пошук ОЗЗ (згідно зі статистичними даними дана величина складає біля 15 хвилин).

Для найгіршого випадку (першого закону розподілу ймовірності переходу ОЗЗ

у міжфазне КЗ) за відомих статистичних даних ( $K_{кр}=1,3$ ;  $\tau_{оч}=0,25$  год;  $t_{кр} = 1,5$  год, а величина  $\Delta t$  прийнята рівною нулю) побудовані графічні залежності виду:  $\tau_0 = f(L_{пер})$  – за середніх швидкостей пересування ОВБ 30; 45 та 60 км/год (рис. 8);  $\tau_0 = f(V_a)$  – за відстаней від місця дислокації ОВБ до місця утворення ОЗЗ 5; 15 та 22 км (рис. 9).

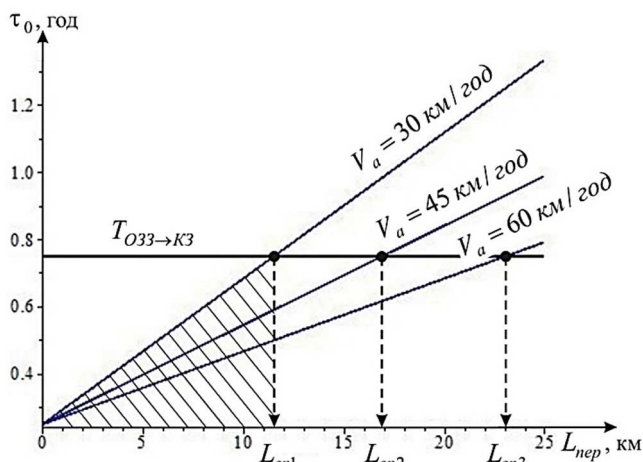


Рисунок 8 – Залежності виду  $\tau_0 = f(L_{пер})$  за середніх швидкостей ОВБ 30; 45 та 60 км/год та  $T_{ОЗЗ \rightarrow КЗ} = 0,75$  год

З рис. 8 видно, що для того щоб ОЗЗ не встигло перейти у міжфазне КЗ в розподільних ЕМ напругою 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» відстань від місця

дислокації ОВБ до місця утворення ОЗЗ не повинна перевищувати:  $L_{гр1}=11,5$ км (за середньої швидкості пересування ОВБ 30 км/год);  $L_{гр2}=17$  км (45 км/год);  $L_{гр3}=23$  км (60 км/год).

З рис. 9 видно, що для того щоб ОЗЗ не встигло перейти у міжфазне КЗ в розподільних ЕМ напругою 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» швидкість пересування автомашини ОВБ повинна бути більшою за:  $V_{a \min 2} = 39$  км/год (за відстані від місця дислокації ОВБ до місця утворення ОЗЗ 15 км);  $V_{a \min 3} = 57,2$  км/год (за середньої швидкості пересування автомашини ОВБ 22 км).

Залежності, зображені на рис. 8-9, можуть бути використані керівним персоналом ПАТ «Чернігівобленерго» під час оптимізації структури обслуговуючого персоналу та його дислокації на місцевості задля одночасного вирішення задачі мінімізації витрат компанії та максимізації показників надійності електропостачання споживачів у випадку запровадження ідентифікатора ОЗЗ, запропонованого автором. Якщо вихідні параметри будуть відрізнятися від тих, за яких побудовані залежності, зображені на рис. 8-9, то вищезазначені задачі можуть бути вирішені шляхом побудови залежностей методом інтерполяції. Інші оператори систем розподілу можуть вирішити дані задачі, використовуючи рівняння, отримані автором.

Для оцінки впливу ідентифікатора на індекси середньої частоти  $SAIFI$  та середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні  $SAIDI$  отримані формули за двох видів розподілу ймовірності переходу ОЗЗ у міжфазне КЗ.

Для першого виду розподілу зменшення індексу середньої частоти довгих перерв в електропостачанні  $\delta SAIFI$  буде визначатися:

$$\delta SAIFI = \begin{cases} k^{(1+1)} \cdot (1 - t/t_{кр}), & t < t_{кр}; \\ 0, & t \geq t_{кр}, \end{cases} \quad (16)$$

а зменшення індексу середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні  $\delta SAIDI$ :

$$\delta SAIDI = \begin{cases} k^{(1+1)} \cdot t_{сер} \cdot (1 - t/t_{кр}), & t < t_{кр}; \\ 0, & t \geq t_{кр}, \end{cases} \quad (17)$$

де  $k^{(1+1)}$  – кількість довгих перерв в електропостачанні за рік, які викликані переходом ОЗЗ в міжфазні замикання;  $t_{сер}$  – середньорічна тривалість довгої перерви в електропостачанні

Для другого виду розподілу формули набудуть вигляду:

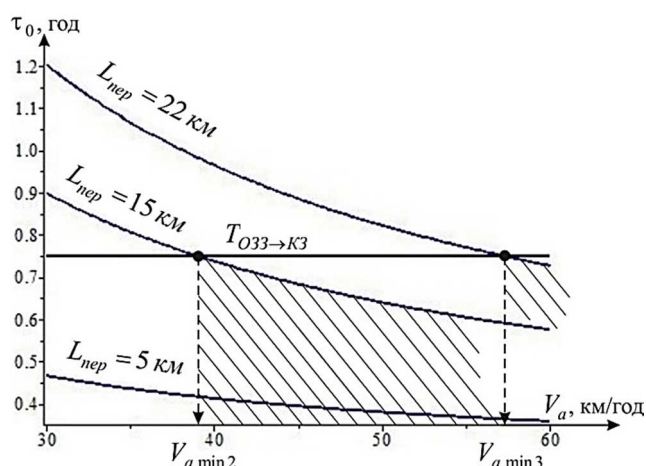


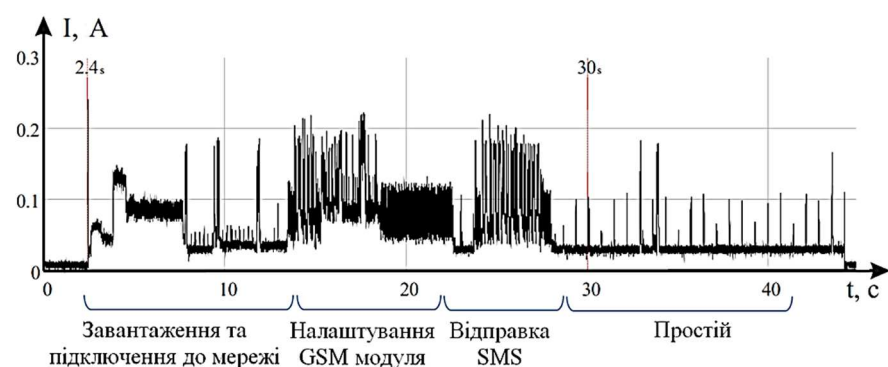
Рисунок 9 – Залежності виду  $\tau_0 = f(V_a)$  за відстаней від місця дислокації ОВБ до місця утворення ОЗЗ 5; 15 та 22 км та  $T_{O33 \rightarrow K3} = 0,75$  год

$$\delta SAIFI = \begin{cases} k^{(1+1)}, & t < t_{кр}; \\ 0, & t \geq t_{кр}, \end{cases} \quad (18)$$

$$\delta SAIDI = \begin{cases} k^{(1+1)} \cdot t_{ссп}, & t < t_{кр}; \\ 0, & t \geq t_{кр}. \end{cases} \quad (19)$$

Використовуючи оброблені статистичні дані за формулами (16)-(19) можна отримати, що у випадку встановлення в електричну мережу ідентифікатора ОЗЗ, запропонованого автором, слід очікувати зменшення індексів середньої частоти довгих перерв в електропостачанні  $\delta SAIFI\%$  та середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні  $\delta SAIDI\%$  на величину до 40%.

У четвертому розділі представлені результати фізичних експериментів в лабораторних та натурних умовах діючих систем розподілу електроенергії, а також представлені та наведені пропозиції щодо інтеграції запропонованого пристрою в сучасні SmartGrid системи управління та моніторингу ЕМ.



Для визначення часу, що витрачається на відправлення повідомлення через стільникову мережу та енергії, яка на це витрачається, було знято осцилограму струму, який споживає модуль під час роботи (рис. 10).

Значення кількості енергії, що необхідна для

Рисунок 10 – Осцилограма струму, що споживається модулем відправки повідомлення пристрою ідентифікації ОЗЗ

відправлення повідомлення можна розрахувати:

$$W_{GSM} = \sum_{i=1}^N (U_i \cdot I_i) \cdot \Delta T, \quad (20)$$

де  $U_i$  – напруга живлення;  $I_i$  – струм, що споживається в  $i$ -й проміжок часу;  $\Delta T$  – період вибірок.

Ємність іоністорів, що слід використовувати в якості накопичувача енергії можна розрахувати за формулою:

$$C = \frac{2 \cdot (W_{GSM} + W_{МК})}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}, \quad (21)$$

де  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  – максимальна і мінімальна напруга конденсатора, при якій підвищуючий стабілізатор напруги БЖ здатен працювати (для стандартного іоністора 2,7В і 0,7В);  $W_{МК}$  – енергія, що затрачена на живлення мікроконтролера та допоміжних елементів схеми.

Використовуюючи отриману осцилограму за формулою (20) розраховано мінімально необхідне значення енергії для відправки повідомлення, яке складає  $W_{GSM} \approx 9 \text{ Дж}$ .

Енергія, що витрачається на живлення мікроконтролера та допоміжних елементів схеми буде значно меншою за  $W_{GSM}$ . Тому нехтуючи її значенням отримано раціональну ємність іоністора (накопичувача енергії), що слід використовувати у запропонованому пристрої ідентифікації ОЗЗ у електричних мережах –  $C \geq 3\Phi$ .

Проаналізовано вплив перехідного опору в місці ОЗЗ на значення струму замикання, що розраховується за формулою

$$I_{O33} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\text{пер}}^2 + (1/(3 \cdot \omega \cdot C_{\text{ПЛ}}))^2}}, \quad (22)$$

де  $U_{\text{Л}}$  – діюче значення номінальної лінійної напруги ПЛ;  $R_{\text{пер}}$  – перехідний опір в місці пробію штирьової ізоляції;  $\omega$  – кутова частота;  $C_{\text{ПЛ}}$  – сумарна ємність електрично зв'язаних ПЛ, що включені від однієї секції шини центру живлення.

З наведеної формули видно, що найбільше значення струму ОЗЗ  $I_{O33}$  буде при  $R_{\text{пер}} = 0$ . Однак, як правило, всі пробіє через ізолятор повітряної лінії 6-10кВ мають певний опір. На рис. 11 показано, як змінюється струм ОЗЗ в місці пошкодження, коли перехідний опір змінюється від нуля до високих значень.

Запропонований пристрій може виявити місце ОЗЗ, проте він буде мати деяку зону

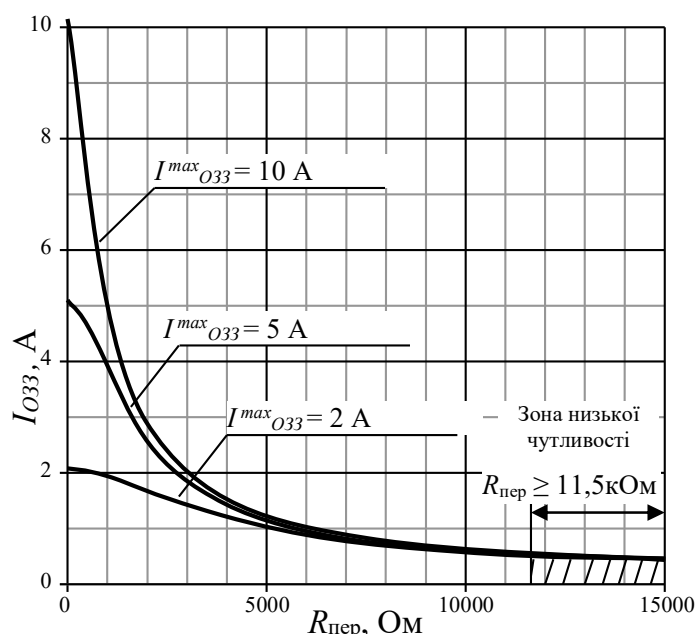


Рисунок 11 – Залежність струму ОЗЗ від перехідного опору пошкодження

нечутливості (рис. 11). За малих струмів ОЗЗ тривалість ідентифікації пошкодження може виявитися зовеликою. Слід також зазначити, що ОЗЗ в мережі з ізольованою нейтраллю можуть носити нестійкий характер. У випадку достатньо тривалої ідентифікації ОЗЗ пошкодження може самоусунутися, а потім виникнути повторно через деякий час. Запропонований ідентифікатор дозволяє виявити таку несправність, але для цього буде витрачений значно більший час особливо при замиканні з великим опором. Як видно з рис. 11, зона низької чутливості ідентифікатора ОЗЗ починається з  $R_{\text{пер}} > 11,5 \text{ кОм}$ .

На основі отриманих даних було створено експериментальний прототип пристрою ідентифікації ОЗЗ. Зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 12.



З використанням обладнання лабораторії «Техніки високих напруг» кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Чернігівська політехніка» проведено дослід по перевірці працездатності пристрою в лабораторних умовах (рис.13).

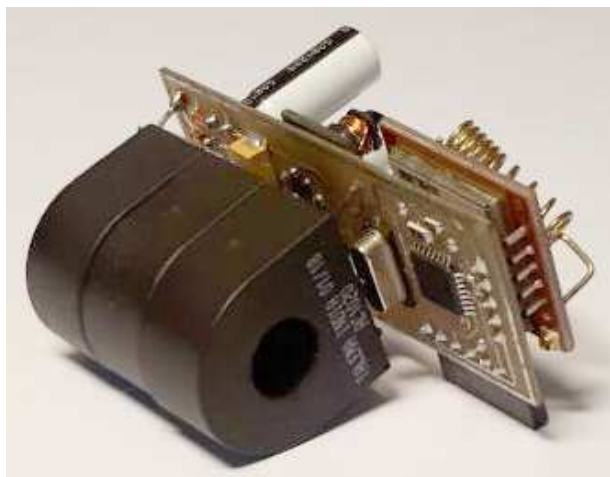


Рисунок 12 – Зовнішній вигляд експериментального прототипу

пробій ізолятора електричною дугою по його поверхні. Через 27с після пробою експериментальний зразок пристрою підключився до мережі стільникового зв'язку та надіслав повідомлення про наявність пошкодження ізолятора.

Розроблено робочий прототип пристрою який було герметизовано епоксидним компаундом та встановлено на дослідну експлуатацію в ЕМ 10кВ ПрАТ «ДТЕК Київські Регіональні Електромережі» – на кутову анкерну опору ПЛ 10кВ Л-54 «Заповідник», що живиться від ПС 35/10кВ «Семіполки». На опорі ПЛ було створена штучне ОЗЗ (закорочено стержневий опорний ізолятор ШФ-20 в одній з фаз). Розрахунковий струм ОЗЗ в ЕМ 10кВ, що живиться від ПС 35/10кВ «Семіполки», складає 5,7А. Через 4,5хв надійшло повідомлення про ОЗЗ від дослідного прототипу пристрою. Після експерименту штучне ОЗЗ було усунуто, а пристрій залишився на дослідну експлуатацію на встановленому місці.

Розглянуто існуючі системи управління та моніторингу в електричних мережах операторів систем розподілу на прикладі ПАТ «Чернігівобленерго». Для підключення запропонованого пристрою до існуючих систем запропонована схема, яка показана на рис. 14. Для її реалізації потрібно використовувати таке обладнання, як GSM-модем, підключений до програмованого логічного контролера (PLC). PLC має приймати повідомлення від пристрою та надсилати його до SCADA-системи для

Перед включенням випробувальної високовольтної установки іоністори пристрою ідентифікації ОЗЗ були заряджені до напруги 0,9 від порогового значення спрацювання для запобігання перегріву лабораторного устаткування. Після включення установки в мережу напруга на виході підвищувального трансформатора плавно збільшувалася Латром до тих пір, поки не утворився



Рисунок 13 – Фото пробою ізолятора під час лабораторного дослідження з пристроєм

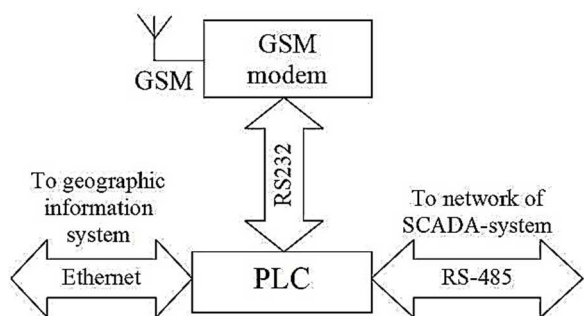


Рисунок 14 – Схема інтеграції пристрою в існуючі системи

ОЗЗ буде кардинально відрізнятися від існуючого. Після того, як сталося пошкодження, ОВБ починає підготовку до відправлення, що займає не менше 10 хвилин. За цей час повідомлення від ідентифікатора ОЗЗ надійде до ГІС-системи та ОВБ негайно вирушає безпосередньо на місце пошкодження для його усунення.

У додатках до дисертації наведена ретроспективна інформація про ОЗЗ по районах ЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» за 2012-2017 роки та наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна задача розвитку теорії пристроїв визначення місць пошкодження в системах електропостачання загального призначення. Запропоновано схемо-технічні рішення запропонованого пристрою, що базується на інноваційному підході до ідентифікації місця пошкодження штирьової ізоляції. Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють зменшити вартість і збільшити ефективність заходів щодо зменшення недовідпуску електричної енергії споживачам в системах електропостачання загального призначення з використанням пристроїв ідентифікації ОЗЗ.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. Проведений аналіз ретроспективної інформації з 2012 по 2017 роки по відмовам, викликаним ОЗЗ в ПЛ 6-10кВ на прикладі ПАТ «Чернігівобленерго», показав, що найбільша кількість знеструмлень виникає через пошкодження штирьової ізоляції (46,8%) та викликає середньорічний недовідпуск електричної енергії 45,9% від загального середньорічного недовідпуску, що у іменованих одиницях становить 21,2 МВт·год/рік. Тому для поліпшення надійності

занесення даних до журналу подій, а також надсилати дані до геоінформаційної системи, що використовується для цілеспрямованого управління ОВБ на місцевості. На рис. 15 наведено приклад яким чином може відображатися інформація від ідентифікатора про наявність ОЗЗ в діючій ЕМ.

Якщо запропонований пристрій буде встановлений на опорах ПЛ, процес усунення

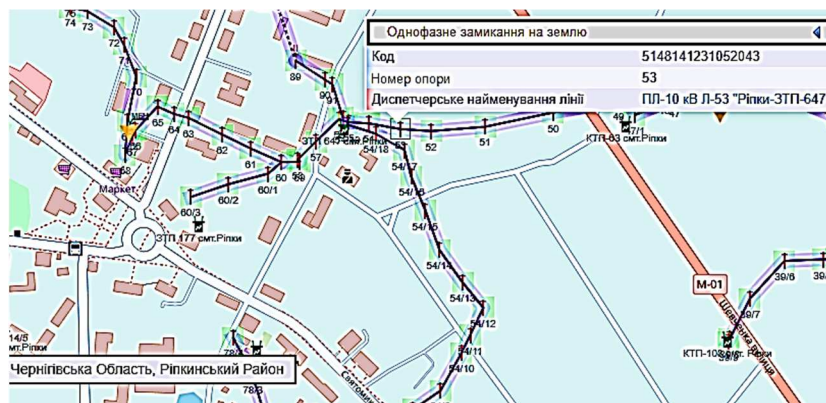


Рисунок 15 – Частина плану смт. Ріпки з існуючої ГІС-системи з усіма опорами та приклад повідомлення про несправність

електропостачання споживачів необхідно, в першу чергу, застосовувати підходи, що зменшать кількість та тривалість знеструмлень, пов'язаних саме з пошуком пошкодженої штирьової ізоляції під час ОЗЗ.

2. Запропоновано спосіб ідентифікації пробною штирьової ізоляції та схемотехнічні рішення його реалізації, що дозволить зменшити час пошуку місця замикання та прискорити усунення пошкодження в системах електропостачання загального призначення 6-10кВ.

3. З використанням математичного моделювання доведено, що кількості енергії, яка може бути відібрана від струму ОЗЗ запропонованим способом, достатньо для живлення пристрою при дотриманні викладених рекомендацій, а експериментальні дослідження показали, що мінімальна кількість енергії, що потрібна запропонованому ідентифікатору ОЗЗ для відправлення повідомлення про пошкодження складає 9 Дж.

5. Запропоновано метод розрахунку показників надійності та ефективності існуючих систем електропостачання при встановленні запропонованих пристроїв ідентифікації місць ОЗЗ. Встановлено, що у випадку інтеграції в електричну мережу ідентифікатора ОЗЗ слід очікувати зниження тривалості відновлення електропостачання  $\delta\theta\%$  та недовідпуску електричної енергії споживачам  $\delta W\%$  на величину до 32%, а також зменшення індексу середньої частоти довгих перерв в електропостачанні  $\delta SAIFI\%$  та індексу середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні  $\delta SAIDI\%$  на величину до 40%.

6. Сформульовані рекомендації щодо впровадження отриманих результатів в інформаційні та комунікаційні системи збору та управління системою електропостачання загального призначення в рамках концепції SmartGrid. Описаний алгоритм роботи персоналу під час ОЗЗ при встановлених пристроях ідентифікації місць пошкодження штирьової ізоляції, запропонованих автором.

7. Результати дисертаційної роботи отримали впровадження в навчальному процесі Національного університету «Чернігівська політехніка» та проходить експериментальну апробацію в діючих системах електропостачання, що знаходяться в експлуатації в ПрАТ «ДТЕК Київські Регіональні Електромережі». Подальше використання результатів роботи передбачається на підприємствах України, які займаються розподілом електроенергії.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

За результатами проведених в дисертаційній роботі досліджень автором опубліковано праці:

1. Ткач В.І. Використання GSM технологій при ідентифікації місць однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю зі штирьовою ізоляцією / В.М. Безручко, Р.О. Буйний, А.Ю. Строгий, В.І. Ткач // Технічна електродинаміка. – 2018. – №5. – С.96-99. – doi:

10.15407/techned2018.05.096. (*фахове видання, категорія А; включено до наукометричної бази Scopus*).

2. Пат. на корисну модель 147799 Україна, МПК G01R31/08. Пристрій ідентифікації однофазних замикань на землю в мережах з ізольованою нейтраллю / В.М. Безручко, Р.О. Буйний, А.Ю. Строгий, В.І. Ткач; заявник та патентовласник Чернігівський національний технологічний університет (UA). – № а2018 03974; заявл. 12.04.2018; опубл. 16.06.2021.

3. Tkach, V. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems / V. Bezruchko, R. Buinyi, A. Strogii, V. Tkach // IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), IEEE Proceedings. – 2019, pp. 84-87. – doi: 10.1109/ESS.2019.8764237. (*включено до наукометричної бази Scopus*)

4. Ткач, В.І. Вплив однофазних замикань на землю на експлуатаційні показники надійності повітряних ліній 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» / В. І. Ткач, В. М. Безручко, Р. О. Буйний // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2019. – № 1. – С. 120-126. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.14 (*фахове видання, категорія Б*).

5. Ткач В.І. Інноваційний підхід до визначення місця однофазних замикань на землю в повітряних мережах 6-35кВ при реалізації концепції Smart Grid в Україні / Безручко В.М., Буйний Р.О., Ткач В.І. // Тези доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019)». – Харків: ХП, 2019. – С.38-41.

6. Ткач В.І. Інноваційний підхід до визначення місць однофазних замикань на землю в мережах 6-35кВ при реалізації концепції SMART GRID в Україні / В.М. Безручко, Р.О. Буйний, В.І. Ткач // Вісник НТУ «ХП», Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2019. – № 1. – С. 15-20. (*фахове видання, категорія Б*).

7. Tkach, V. The expected reduction of energy not supplied to consumers after installation the identifiers of single-phase-to-earth fault in power networks with isolated neutral/ Bezruchko, V., Buinyi, R., Tkach, V., Miroshnyk, O. // ТЕКА: Quarterly Journal of Agri-Food Industry. – 2020, Vol.20, No.1, pp.27-31 (*періодичне наукове видання країни Європейського Союзу*).

8. Ткач В.І. Відбір потужності від струму однофазного замикання на землю для живлення приладу ідентифікації замикання/ Безручко В.М., Буйний Р.О., Ткач В.І. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – №4(151). – С.25-31. – doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-4-25-31 (*фахове видання, категорія Б*).

9. Ткач В.І. Інтеграція пристроїв ідентифікації однофазних замикань на землю в SCADA-систему диспетчерського управління / В.М. Безручко, Р.О. Буйний, А.Ю. Строгий, В.І. Ткач // Тези доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021)». – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – Т. 2. – С.146-148.

## АНОТАЦІЇ

**Ткач В.І. Система ідентифікації місць однофазних замикань на землю у повітряних електричних мережах з ізолюваною нейтраллю.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні системи і комплекси. – Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена подальшому розвитку теорії і практики пристроїв визначення місць пошкодження в системах електропостачання загального призначення.

Проведено аналіз ретроспективної інформації по відмовам в ПАТ «Чернігівобленерго» та встановлено, що найбільша кількість знеструмлень виникає через пошкодження штирьової ізоляції (46,8%) в трифазних системах з ізолюваною нейтраллю.

Запропоновано інноваційний спосіб визначення місця однофазного замикання на землю за рахунок ідентифікації струму замикання через штирьову ізоляцію на опорі повітряної лінії, що дозволяє створити пристрій, який зменшить час пошуку місця замикання та прискорить усунення пошкодження.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість відбору достатньої кількості енергії для живлення пристрою від струму однофазного замикання на землю без втручання в конструкцію заземлюючого пристрою опори повітряної лінії.

Запропоновано метод розрахунку показників надійності та ефективності функціонування існуючих систем електропостачання із запропонованими автором пристроєм ідентифікації замикання. Показано, що у випадку інтеграції запропонованого пристрою слід очікувати зниження недовідпуску електричної енергії споживачам на величину до 32%, а також зменшення індексу середньої частоти та індексу середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні на величину до 40%.

Отримані графічні залежності, які можуть бути використані керівним персоналом для оптимізації структури обслуговуючого персоналу та його дислокації на місцевості задля одночасного вирішення задачі мінімізації витрат компанії та максимізації показників надійності електропостачання споживачів у випадку запровадження запропонованого пристрою ідентифікації замикань.

Створено експериментальний прототип та підтверджено його працездатність як у лабораторних умовах, так і в умовах реальної експлуатації.

**Ключові слова:** *система розподілу електроенергії, ізолювана нейтраль, штирьова ізоляція, однофазне замикання на землю, показники надійності електропостачання, пошук місця пошкодження.*

**Tkach V.I. System for identification of line-to-earth faults in overhead power networks with isolated neutral. – Manuscript.**

Dissertation for Candidate degree (Ph.D.) in specialty 05.09.03 – electrical complexes and systems. – National university «Chernihivska politekhnika», Chernihiv, 2021.

Dissertation is devoted to the further investigation of the theory and practice of devices for locating fault in the power supply systems.

The analysis of retrospective information of PJSC "Chernihivoblenergo" allowed found the number of emergency shutdowns occurs due to damage to pin insulation (46.8 %) in three-phase systems with isolated neutral.

An innovative method for searching a line-to-earth fault location is proposed which based on the identification of the fault current through the pin-type insulation on the overhead line tower, it allows to create a device that will reduce the fault location search and restoration time.

Using mathematical modeling, it has been proven that the amount of energy that can be taken from the fault current by the proposed method will be enough to powered the proposed device.

The possibility of taking an enough energy to power the device from a line-to-earth fault current without reconstruction the grounding device of the overhead line tower has been theoretically substantiated and experimentally confirmed.

A method is proposed for calculating the indicators of reliability and efficiency of functioning of existing power supply systems with proposed identification device. It is shown that in the case of integrating fault identifier into existing power networks, one should expect a decrease in the Expected Energy Not-Supplied to consumers by down to 32%, as well as a decrease in the System Average Interruption Frequency and Duration Index of long interruptions in power supply by up to 40%.

The graphical dependencies are obtained that can be used by the management personnel to optimize the structure of service personnel and their location in the area to simultaneously solve the problem of minimizing the operating costs and maximizing the reliability of power supply to consumers in the case of installing an innovative line-to-earth faults identifier devices.

An experimental prototype of the identifier device has been created and its working capacity has been shown both in the laboratory conditions and in the conditions of real operation.

**Keywords:** *electrical power distribution system, isolated neutral, pin insulation, line-to-earth fault, power supply reliability indicators, search for a fault location.*

Підписано до друку 18.08.2021 р. Формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 31/21.

---

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.