

И.В. ПРЫТЫСКАЧ, аспирант

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМАХ
МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Нарушения в работе силовых трансформаторов непосредственно влияют на надежность энергосистемы в целом, что объясняет высокие требования, предъявляемые к их надежности. Для выявления дефектов трансформатора на ранней стадии их развития наиболее эффективны системы непрерывного мониторинга, выполняющие оценку текущего состояния. В работе рассмотрены возможности использования различных моделей физических процессов, влияющих на состояние трансформатора, как составных частей системы мониторинга. Наиболее часто в трансформаторе повреждается изоляционная система, которая несет в работе тепловых, электрических и механических воздействий. Для оценки старения изоляции важнейшим параметром является температура наиболее нагретых точек. Как термическая модель для использования в системе мониторинга силового трансформатора могут быть предложены как модели описаны в стандартах IEC и IEEE, так и более точные модели описаны в современных работах.

Ключевые слова: мониторинг, силовой трансформатор, оценка состояния, тепловая модель, модель влагосодержания.

УДК 621.316:681.3

О.Ю. ПОЛЩУК, аспирант

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины.

**ВИЗНАЧЕННЯ АВАРІЙНИХ ДІЛЯНОК ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДИКАТОРІВ ПОШКОДЖЕНЬ**

У статті наведено особливості функціонування пристроїв, що визначають місце пошкодження повітряних ліній електропередачі. Метою дослідження є визначення особливостей використання індикаторів пошкоджень в розподільних електричних мережах та методики визначення місць встановлення та кількості індикаторів. Методика полягає у вивченні процесу виявлення пошкодження за допомогою параметрів аварійного режиму та аналізі вимог та особливостей при розставленні індикаторів пошкоджень у мережі. Результатами дослідження є визначені складові методики розташування пристроїв, що аналізують стан розподільної мережі та визначають аварійні ділянки з урахуванням основних теоретичних положень їх роботи та характеристик. Проведені дослідження свідчать про необхідність проведення подальшого розвитку у напрямку деталізації отриманих результатів та визначенні системного підходу для автоматизації пошуку та локалізації місця пошкодження ліній електропередачі.

Ключові слова: індикатор, пошкодження, лінії електропередачі, магнітне поле, електричне поле.

Вступ

Пошкодження ліній електропередачі (ЛЕП) призводить до збою у роботі електроенергетичних мереж, що позначається на електропостачанні споживачів. Тому однією з найважливіших є задача швидкого і точного визначення місця пошкодження ЛЕП, розв'язання якої дає значний економічний ефект, обумовлений скороченням перерв у електропостачанні, зменшенням транспортних витрат на обхід ЛЕП, мінімізацією загального часу організації ремонтно-відновлюваних робіт [1, 2]. Причому особливої актуальності ця задача набуває у розподільних електричних мережах 6-35, а також 110 кВ, які характеризуються як наявністю кількох фідерів на шинах підстанції, так і великою кількістю розгалужень на самих ЛЕП, зокрема в мережах 6-35 кВ. Така структура розподільних ЛЕП обумовлює появу еквіструмових зон, що суттєво ускладнює стратегію пошуку місця пошкодження [3].

Мета та завдання

Метою статті та завданнями досліджень є визначення особливостей використання індикаторів пошкоджень в розподільних електричних мережах з огляду на їх основні параметри та визначення складових практичної методики визначення кількості та місць встановлення індикаторів пошкодження.

Матеріал і результати досліджень

Методи та засоби пошуку місця пошкодження, що використовуються на сьогоднішній день в розподільних електричних мережах, не завжди ефективні та зумовлюють суттєві витрати часу і ресурсів

на пошук аварійних ділянок ЛЕП. Тому для підвищення ефективності моніторингу стану розподільних електричних мереж необхідно впровадження нових технологій пошуку аварійних ділянок ЛЕП. Одним із напрямків розвитку систем моніторингу розподільних електричних мереж є встановлення індикаторів пошкоджень повітряних ліній електропередачі – засобів, що набувають дедалі більшого розповсюдження в електричних мережах європейських країн. Такі пристрої використовуються для визначення міжфазних коротких замикань (КЗ) та однофазних замкнень на землю, виявлення стійких та нестійких пошкоджень, незалежно від типу нейтралі у розподільчій мережі з напругою 6-35 кВ та 110-150 кВ.

При встановленні індикаторів розрізняють два типи: на опорі та на провіді ЛЕП. Кожен з таких типів реагує на різні пошкодження, тому передбачається встановлення їх для роботи при сумісному підвищенні на ЛЕП різних класів напруги. Так, індикатори на провід є однофазними; вони реагують на міжфазні КЗ та замкнення на землю, для повноцінного функціонування та локалізації пошкоджень у повітряних лініях розподільчих мереж, бажано встановлювати на кожному проводі перегону мережі.

Пристрої, що встановлюються на опорі ЛЕП використовуються для однофазних та трьохфазних повітряних ліній та здатні розрізнити двофазні КЗ та замкнення на землю у мережі при достатньому значенні струму пошкодження.

Найчастіше у мережі виникають однофазні замкнення на землю. Струм такого пошкодження обумовлюється ємкостями трьох фаз по відношенню до землі. Напругу пошкодженої фази відносно землі у зв'язку з дуже малим струмом замикання на землю, можна вважати в будь-якій точці мережі рівною нулю. Струм замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю (це мережі напругою 6-10 та часто 35 кВ), як і струм однофазного КЗ, містить складові прямої, зворотної та нульової послідовностей.

У мережі із глухозаземленою нейтраллю (це мережі напругою нижче 1 кВ та вище 110 кВ) у місці замикання проходить великий струм КЗ. У мережі з ізольованою або заземленою через дугогасильний реактор нейтраллю струм однофазного замикання на землю має невеликі значення, що визначаються ємністю проводів мережі щодо землі.

Принцип дії індикаторів пошкодження ліній електропередачі полягає у вимірюванні складових напруженості електричного та магнітного полів. Пристрій вимірює значення електромагнітної області нижче самої лінії електропередачі, що забезпечує визначення ділянки на наявність пошкоджень.

Взаємозв'язок між електричною та магнітною складовими електромагнітного поля, що взаємно обумовлюють одна одну, описують рівняння Максвелла.

Індикатор аналізує стан електромагнітного поля окремих фазних проводів мережі та слідкує за значеннями напруги та струму нульової послідовності. Розглянемо як відбувається індикація у пристроях, що встановлюються на опорі.

Індикатор, що встановлюється на опорі аналізує складові величини магнітної індукції, що надходять від проводів (рисунок 1) за допомогою двох вмонтованих котушок, де горизонтальна котушка відстежує струм пошкодження на землю, а вертикальна – міжфазний.

Індикатори, що встановлюються на лінії електропередачі мають дещо інший принцип сприйняття та аналізу даних параметрів мережі.

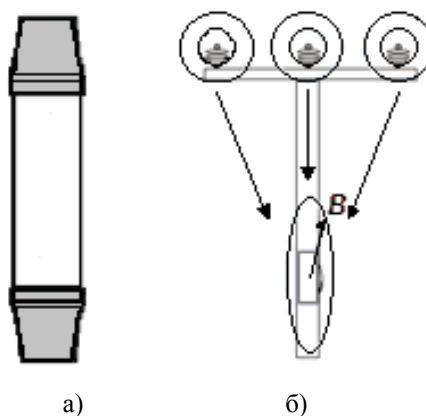


Рисунок 1 – Індикатор для встановлення на опорі:
а) загальний вигляд; б) принцип надходження даних до індикатора

Магнітне поле, що генерується струмом лінії, індукує сигнал в приймальній котушці індикаторів. Цей індукований сигнал подається на датчик di/dt , для того, щоб можна було відрізнити струм пошкодження від струму навантаження. Датчик di/dt виявляє моментальне збільшення рівня струму, і якщо він більше від рівня встановленого значення, індукує виникнення пошкодження. Для виявлення

лінійної напруги використовується антена, що розміщується всередині індикатора. Поява магнітного поля (згідно другого рівняння Максвелла) фіксується датчиком магнітного поля.

Величина, що вимірюється індикатором для виявлення пошкодження складається з горизонтальної (струм нульової послідовності) та вертикальної (напруга нульової послідовності) компонентів електромагнітної області. Розглянемо закони, які є основою для визначення даних складових компонентів.

Теоретична дія індикаторів заснована на законі Ампера, що визначає силу dF , яка діє на елемент провідника dS зі струмом I [4]:

$$dF = I \cdot dS \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

де B – вектор магнітної індукції,

α – кут між напрямком струму у провіднику та напрямком індукції магнітного поля.

Магнітна індукція, що створюється безкінечним прямолінійним струмом [5]:

$$B = \frac{\mu_o \cdot I}{2\pi \cdot r}, \quad (2)$$

де μ_o – магнітна стала, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м,

r – радіус ділянки, яка розглядається, м.

З урахуванням закону повного струму, що свідчить про циркуляцію вектору магнітної індукції по довільному замкненому контурі, яка дорівнює сумі струмів, що охоплюється цим контуром, (2) набуває вигляду:

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_o \cdot I}{2\pi \cdot r}. \quad (3)$$

Так як необхідно для визначення є горизонтальна складова, застосовують (4) для опису напруженості магнітного поля у точці (x, y) для набору з n провідників у положенні (x_i, y_i) :

$$B_x = \sum_{i=1}^n \left[-\frac{\mu_o \cdot I}{2\pi \cdot r} \cdot \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (4)$$

Вертикальна складова – напруженість електричного поля для будь-якої точки простору впливає з наслідків закону Гауса, який стверджує про те, що потік вектора напруженості \vec{E} через довільну замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, замкнених у цій поверхні та поділений на величину ϵ_o :

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\epsilon_o} \quad (5)$$

де ϵ_o – електрична стала, $\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/н·м.

Тоді для опису напруженості електричного поля у точці (x, y) для набору з n провідників у положенні (x_i, y_i) :

$$E_y = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\epsilon_o \cdot q_i}{2\pi} \cdot \frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (6)$$

Координати ділянки кожного проводу складають матрицю β_{ij} величин потенціалів q_i , що використовується при розрахунках взаємодії магнітного та електричного полів та визначенні напрямку пошкодження індикатором.

Для знаходження координат коефіцієнтів (коли $i \neq j$) матриці потенціалів для (4) та (6), користуються виразом:

$$\beta_{ij} = \frac{\epsilon_o}{2\pi} \cdot \ln \left\{ \frac{\sqrt{(x_i + x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \right\} \quad (7)$$

Для коефіцієнтів з індексами $i=j$, формула (7) набуває вигляду:

$$\beta_{ij} = \frac{\epsilon_o}{2\pi} \cdot \ln \left\{ \frac{2h_i}{r_i} \right\}, \quad (8)$$

де h_i – висота i проводу над землею,

r_i – радіус i проводу.

Величину заряду лінії можна отримати помноживши вираз (7) або (8) на рівень напруги:

$$q = \beta^{-1} \cdot U \quad (9)$$

Значення кожної складової величин (4) та (6) кожного провідника додаються для визначення загального електричного та магнітного полів для знаходження положення пошкодження індикатором.

Деякі індикатори спроможні полегшувати пошук місця аварії візуально. Тобто, людині, яка знаходиться безпосередньо біля повітряної лінії електропередачі, пристрій вказуватиме напрям руху у місці пошкодження (блмання зеленим кольором означатиме, що місце пошкодження попереду, а червоним – позаду).

Визначення наявності пошкодження у мережі та виявлення його напрямку відбувається при порівнянні фазних значень параметрів, як показано на рисунку 2.

У таких індикаторах визначення напрямку пошкодження відбувається на основі порівняння полярностей значень двох напруженостей: електричного (E) та магнітного (B) полів, їх напрямлень E_y та B_x . Якщо значення знаходяться в одній фазі – пошкодження попереду, якщо у протифазі – позаду.

Якщо у місці пошкодження відхилення миттєвого значення полярності струму між теперішнім та попереднім станом, знаходиться у тому ж напрямі, що і виміряне значення напруги, це свідчить про те, що напрямок виникнення пошкодження - попереду.

Наприклад, якщо напруга має позитивну полярність, то виникнення пошкодження спричинить відхилення струму у даному стані від попереднього (стану) у позитивному напрямку. Якщо напруга має негативну полярність, виникнення пошкодження сприятиме тому, що теперішній стан струму відхилиться від попереднього стану струму у протилежному напрямі.

Розглянемо індикатор, що визначає напрямок пошкодження за допомогою значень остаточного струму та напруги. Так, наприклад, у мережі із ізольованою нейтраллю можна ідентифікувати замкнення на землю шляхом дослідження остаточного струму та коливань напруги одразу після аварії.

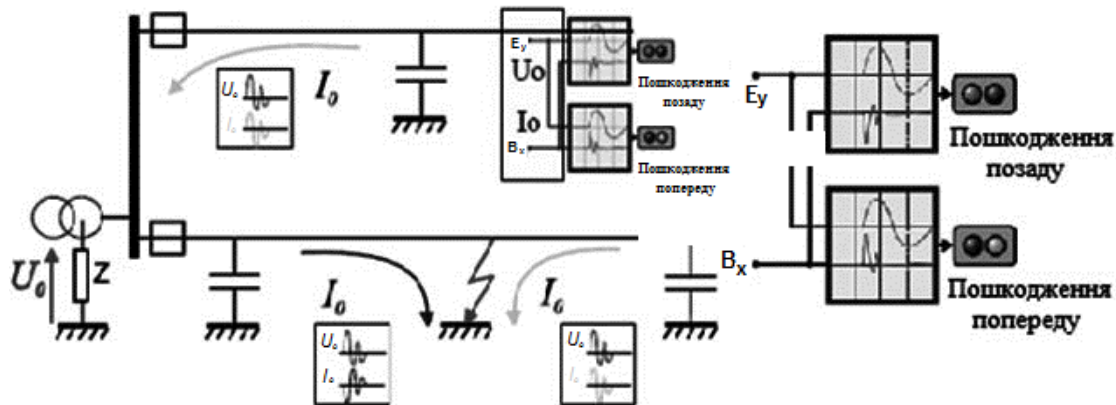


Рисунок 2 – Порівняння параметрів для визначення пошкодження на землю

Як показано на рисунку 3, при виникненні пошкодження спрацьовують всі індикатори, встановлені на проводі (проводах) пошкодженої фази, що розташований на ділянці між живильною підстанцією та місцем пошкодження. При цьому індикатори, розташовані за точкою несправності або на непошкодженому фазному проводі (проводах), залишаються в режимі очікування.

Як вже зазначалося, при роботі індикатора джерелом інформації є значення фазної напруги та струму у лінії, які постійно відстежуються пристроєм та є запрограмованими у ньому на певні критичні величини.

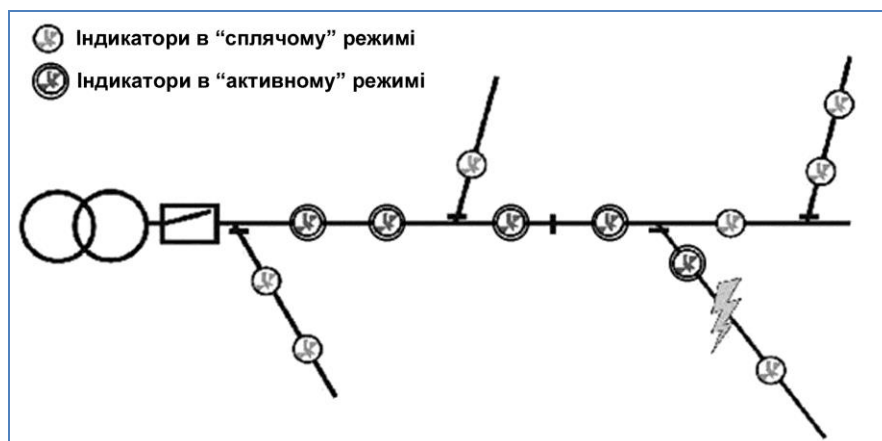


Рисунок 1 – Режим індикаторів при виникненні пошкодження ЛЕП

Оскільки індикатор пошкодження відстежує значення струму, які можуть бути наслідком пошкодження лінії, необхідно враховувати аспекти розрахунку і величини струму відключення.

Узагальнена схема функціонування індикатора пошкоджень відображена на рисунку 4(а). Виділяються три основні події, що спричиняють зміну режиму роботи індикатора:

- після подання напруги на ЛЕП встановлюється затримка часу спрацювання індикатора інтервалом в кілька секунд (подія 1 на рисунку 4 а);

- при миттєвому збільшенні струму в ЛЕП (подія 2 на рисунку 4 а) здійснюється порівняння дійсного значення струму з встановленим на індикаторі значенням струму i , у випадку перевищення цього значення, визначається наявність пошкодження та розпочинається його індикація;

- при знеструмленні ЛЕП (подія 3 на рисунку 4 а) внаслідок дії захисних комутаційних апаратів, індикація пошкодження продовжується.

Графічне відображення схеми зміни режиму роботи індикатора показано на рисунку 4(б).

Слід відзначити, що струм, необхідний для достатнього збільшення напруженості магнітного поля, залежить і від наступних факторів: відстань між індикатором і проводом (відстань від проводів вимірюється від найнижчого проводу); конфігурації лінії; струму навантаження.

Враховуючи вищезазначене, використання таких індикаторів в електричних мережах України потребує дослідження практичних методик їх розташування з метою забезпечення ефективності визначення аварійних ділянок ліній електропередачі.

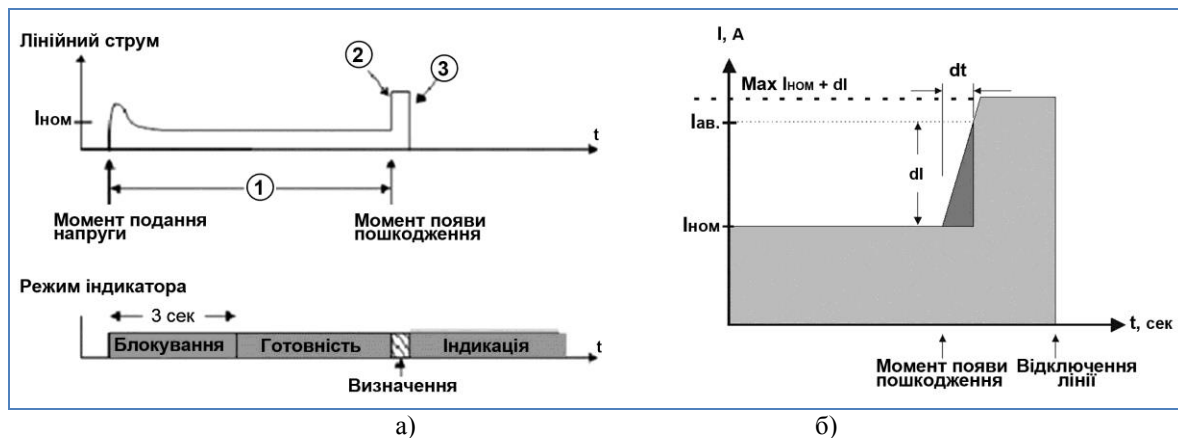


Рисунок 4 – Функціонування індикатора пошкоджень:
а) послідовність спрацювання; б) принцип дії

Проведені дослідження показали, що застосування індикаторів, як правило, вимагає попереднього обстеження лінії для максимально ефективного його використання. Основні складові методики щодо встановлення індикаторів пошкодження передбачають:

1) розгляд попорної електричної схеми ділянки мережі, на якій планується вживання заходів;
2) виділення радіальних, не кільцевих ліній із одностороннім живленням, на які слід встановлювати індикатори;

3) розстановка індикаторів на опорах схеми, рухаючись від центру живлення до розгалужень. Після точки відгалуження на кожній гілці варто встановлювати на першій же опорі (особлива увага при наявності опори із Т-образним відгалуженням – безпосередньо на цю опору індикатор не встановлюється);

4) аналіз пристроїв, що вже встановлені у даній мережі на предмет наявності:
- секційних роз'єднувачів та розподільчих трансформаторів на опорах, у випадку виявлення – викреслити індикатор;

- запобіжних пристроїв на лініях електропередачі, у випадку виявлення – викреслити індикатор;

5) при наявності опор із підземними кабелями, індикатор не встановлювати;

6) аналіз та виключення індикаторів на опорах, якщо відстань:

- ближче, ніж 300 м до ліній 220-440 кВ;

- ближче, ніж 150 м до ліній 132 кВ;

- ближче, ніж 100 м до ліній 66 кВ;

- ближче, ніж 50 м до ліній 33 кВ;

- ближче, ніж 35 м до ліній 22 кВ;

7) проведення аналізу/розрахунку та визначення ділянок лінії, на яких струм ємнісного розряду в напрямку від мережі, що перевищує рівень відключення (індикатор може активізуватись);

8) на ділянках із паралельними лініями, а також для зменшення вартості впровадження слід залучати однофазні індикатори, встановлювані на лінію;

9) аналіз стану забезпечення індикації розглянутих ділянок мережі з урахуванням можливих невизначеностей через режими роботи мережі;

10) після визначення місця встановлення індикатор піддається монтажу безпосередньо на визначеному місці без відключення лінії від живлення.

Географічна місцевість впливає на ефективність результатів від роботи індикаторів. Тому, рекомендується встановлювати ці індикатори

- у легко доступних точках лінії для полегшення контролю за індикатором у разі несправності, наприклад, поруч із проїзною частиною. Бажано використовувати бінокль;
- до та після важко досяжних точок лінії (гори, ліс і т. п.) для швидкої локалізації несправності;
- поруч з точками відгалуження лінії з метою спрощення локалізації пошкодженого відгалуження;
- поруч із точками підключення до лінії секційних роз'єднувачів для швидкої локалізації та ізоляції несправності для полегшення швидкого повторного підключення справних ділянок.

Висновки

Для підвищення ефективності енергопостачання у розподільних електричних мережах України необхідним є впровадження сучасних технологій пошуку аварійних ділянок ЛЕП. Такими новими технологіями є індикатори пошкоджень, що встановлюються безпосередньо на провід лінії або на опорі та відстежують зміну електромагнітного поля у випадку виникнення пошкодження. Встановлення індикаторів на провіді ЛЕП забезпечить виявлення міжфазних КЗ та замкнень на землю, а їх встановлення на опорі – однофазних та трьохфазних КЗ. Розміщення цих пристроїв потребує ретельного аналізу стану, конфігурації та режиму роботи мережі, отже необхідним є розроблення методів та практичних методик визначення кількості та місць встановлення таких пристроїв для надійного та суцільного контролю з урахуванням особливостей електричних мереж України. Виконані дослідження показали можливість та доцільність використання індикаторів пошкоджень, сформовані основні складові методики щодо їх встановлення. Однак ефективність використання індикаторів пошкоджень в Україні потребує подальших досліджень щодо деталізації отриманих результатів та визначенні системного підходу для автоматизації пошуку та локалізації місця пошкодження ліній електропередачі.

Література

1. Блінов І.В., Парус Є.В., Поліщук О.Ю., Журавльов І.В. Моніторинг стану повітряних ліній електропередачі з використанням індикаторів пошкоджень // Енергетика та електрифікація. – 2013. – № 9. – С. 7 – 11.
2. Аржанников Е.А. Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях: [Учебное пособие] / Е.А. Аржанников, А.М. Чухин. – Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 1998. – 74 с.
3. Шалыт Г.М. Определение мест поврежденной линии электропередачи по параметрам аварийного режима / Г.М. Шалыт, А.И. Айзенфельд, А.С. Малый; под ред. Г.М. Шалыта. – [2е изд., перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
4. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: [Учебное пособие для студентов вузов] / И.Е. Иродов. – М.: Высш. шк., 1991. – 289 с.
5. Bjerkan E., Venseth T. Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators // International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) – 2005. – Paper № IPST05 – 107p.

O. POLISCHUK, postgraduate student

The Institute of Electrodynamics The National Academy of Sciences of Ukraine DEFINITION OF EMERGENCY SECTIONS OF TRANSMISSION LINES USING FAULT INDICATORS

The article describes the features of the operation of devices that define the fault place of overhead lines. Research objective is definition of features of use of faults indicators to distributive electric networks and a technique of definition of setting points and quantity of indicators. The technique consists in studying of process of revealing of a fault by means of parametres of an emergency operation and the analysis of demands and features at arrangement of faults indicators in network. Results of research are certain making techniques of an arrangement of devices which analyse a condition of a supply network and define emergency sections with taking into account the basic theoretical rules of their work and characteristics. Research results testify to necessity of conducting of the further development in direction of refining the gained results and definition of the system approach for automation of search and localisation of fault place in powers line.

Keywords: indicator, fault, overhead lines, magnetic field, electric field.

1. Blinov I.V., Parus Ye.V., Polischuk O.Yu., Zhuravlov I.V. Monitoring of overhead lines using fault indicators // Power and Electrification. – 2013. – № 9. – S. 7-11.
2. Arzhannikov E.A. Methods and instrumentation for determining short-circuit lines: [Textbook] / E.A. Arzhannikov, A.M. Chuhin. – Ivanovo: Ivanovskiy gos. energeticheskiy un-t, 1988. – 74 s.
3. Shalyt G.M. Definition fault places of overhead lines by parameters in emergency mode / G.M. Shalyt, A.I. Ayzenfel'd, A.S. Malyu; pod red. G.M. Shalyta. – [2e izd., pererab. i dop.]. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 208 s.
4. Irodov I.E. Basic laws of electromagnetism: [Textbook for university students] / I.E. Irodov. – M.: Vyssh. sshk., 1991. – 289 s.
5. Bjerkan E., Venseth T. Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators // International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) – 2005. – Paper № IPST05 – 107 p.

УДК 621.316:681.3

Е.Ю. ПОЛИЩУК, аспірант

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АВАРИЙНЫХ УЧАСТКОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДИКАТОРОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В статье приведены особенности функционирования устройств, определяющих место повреждения воздушных линий электропередачи. Целью исследования является определение особенностей использования индикаторов повреждений в распределительных электрических сетях и методика определения мест установки и количества индикаторов. Методика заключается в изучении процесса выявления повреждения с помощью параметров аварийного режима и анализе требований и особенностей при расстановке индикаторов повреждений в сети. Результатами исследования являются определенные составляющие методики расположения устройств, которые анализируют состояние распределительной сети и определяют аварийные участки с учетом основных теоретических положений их работы и характеристик. Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости проведения дальнейшего развития в направлении детализации полученных результатов и определения системного подхода для автоматизации поиска и локализации места повреждения линий электропередачи.

Ключевые слова: индикатор, повреждение, линии электропередачи, магнитное поле, электрическое поле.

УДК 622.1/2

І. М. СТРЕЛЬЦОВА, аспірант,

О. М. ТЕРЕНТЬЄВ, д-р техн. наук, професор;

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІНИ ПИТОМОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ РУЙНУВАННІ ОБЕРТОВО-ГІДРОКАВІТАЦІЙНИМ СПОСОБОМ

У статті обрано та обґрунтовано тип плану експериментального дослідження зміни питомої поверхневої енергії гірських порід при руйнуванні обертово - гідрокавітаційним способом – ненасичений центральний композиційний план. Поставлена задача оптимізації - знаходження значення кута та довжини дифузора різця кавітаційного, що забезпечують максимальну продуктивність при мінімальній енергоємності. Визначені незалежні змінні параметри - кута та довжини дифузора різця кавітаційного з відповідними рівнями варіювання: 45° , 60° , 75° та 0.006 м, 0.009 м, 0.012 м. Прийнято параметр оптимізації – енергоємність руйнування. Пораховано необхідну і достатню кількість дослідів – дев'ять. Побудовані матриці планування експерименту у явному та не явному вигляді з зазначенням порядку проведення дослідів. Створено функціональну схему експериментального стенду. Для дослідження зміни питомої поверхневої енергії при руйнуванні вищевказаним способом обрано метод Обреїмова.

Ключові слова. гірська порода, руйнування, план, експеримент, енергоємність, матриця