

УДК 621.311.1.014.7

**КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ПОШУКУ ПОШКОДЖЕНЬ В ПОВІТРЯНІЙ МЕРЕЖІ 6-10 КВ**

*Кутін В.М., д.т.н., проф., Луцяк В.В., асп., Матвієнко С.В., асп.  
Вінницький національний технічний університет  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
E-mail: fpke@rambler.ru*

Предложен комплексный метод поиска повреждений в воздушных распределительных сетях с учетом их неоднородности. Метод основан на совместном использовании статических и динамических характеристик сети. Предложенный метод имеет более высокую точность и надежность полученных результатов в сравнении с методами, которые использовались ранее.

**Ключевые слова:** дистанционный метод, неоднородность, метод последовательного деления

Method of fault location in air distributive networks with taking into account different types of its nonhomogeneous is assembled. Method based on jointly use of static and dynamic characteristics of network. Presented method has higher accuracy and reliability of derived results in comparison with earlier used methods.

**Key words:** distance method, nonhomogeneous, consecutive division method

**Вступ.** Питома кількість пошкоджень в розподільних мережах (РМ) 6-35 кВ залишається досить значною і за даними ВАТ "Вінницяобленерго" у 2004-2005 р. склала 18,3 та 16,6 пошкоджень на 100 км РМ відповідно. Визначення місць пошкодження (ВМП) є складною довготривалою технологічною операцією, яка стала повсякденною оперативною задачею диспетчерських служб електричних мереж. Проведені дослідження існуючих методів [1-5] показали, що існує задача вдосконалення процесу пошуку пошкоджень в повітряних розподільних мережах. При врахуванні особливостей об'єкта дослідження було встановлено, що рішення даної задачі лежить на шляху сумісного використання досконалих дистанційних, топографічних методів та методу послідовного поділу мережі [8].

**Мета роботи.** Підвищення точності визначення місць пошкоджень шляхом сумісного використання статичних та динамічних характеристик розподільних повітряних мереж.

**Матеріал і результати дослідження.** Враховуючи значний рівень неоднорідності РМ, що обумовлено вище наведеними характеристиками, пропонується підхід до розв'язання задачі ВМП, що заснований на поєднанні принципово різних методів ВМП, кожен з яких вирішує відповідну локальну задачу, виходячи із наявної вхідної інформації. Процес ВМП розглядається як послідовність операцій виявлення пошкодженої системи електропостачання, лінії, ділянки лінії та її елемента.

В разі пошуку місця міжфазного к.з. на повітряній РМ з використанням динамічної характеристики системи основним є дистанційний метод. Метод ґрунтується на фіксації параметрів доаварійного та аварійних режимів (ПАР) на кожному приєднанні.

В якості критерію наближення множини розрахункових ПАР з множиною виміряних використо-

вують функцію:

$$F(I_{\Pi}) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} \left( \frac{\Pi_{pi}}{\Pi_{pj}} - \frac{\Pi_i}{\Pi_j} \right), \quad (1)$$

де  $\Pi_i, \Pi_j, \Pi_{pi}, \Pi_{pj}$  – відповідно виміряні і розраховані параметри;  $i, j = 1, 2, \dots, k$ ;  $l_n$  – відстань до місця пошкодження.

Коефіцієнт  $a_{ij}$  відображає вагові частини різних складових функції  $F(I_{\Pi})$ . Розраховують також очікувану похибку  $\pm \Delta I_{\Pi}$ , що визначає необхідну зону обходу лінії під час пошуку пошкоджень на її трасі.

Найбільш прийнятним методом ВМП для мереж 6-35 кВ є метод однобічної фіксації ПАР: струму к.з.  $I_{K3}$ , реактивної складової напруги петлі к.з. і струму навантаження на ввіді в підстанцію  $I_H$ . Визначення відстані до місця к.з. відбувається за алгоритмом:

$$l_{\Pi} = \frac{U_P}{|I_{K3} - I_H| X_{\Pi}}, \quad (2)$$

де  $X_{\Pi}$  – реактивний питомий опір повітряної лінії.

Для оцінки можливостей підвищення точності дистанційних методів ВМП проведено аналіз складових похибки. Методичну похибку вимірювання можна визначити як відносну середньоквадратичну з виразу (2):

$$\begin{aligned} \zeta(I_{\Pi}) &= \sqrt{\left( \frac{\partial I_{\Pi}}{\partial U_P} \cdot \frac{dU_P}{I_{\Pi}} \right)^2 + \left( \frac{\partial I_{\Pi}}{\partial I_{K3}} \cdot \frac{dI_{K3}}{I_{\Pi}} \right)^2 +} \\ &= \sqrt{\zeta_{U_P}^2 + \zeta_{I_{K3}}^2 + \zeta_{I_H}^2 + \zeta_{X_{\Pi}}^2}, \quad (3) \end{aligned}$$

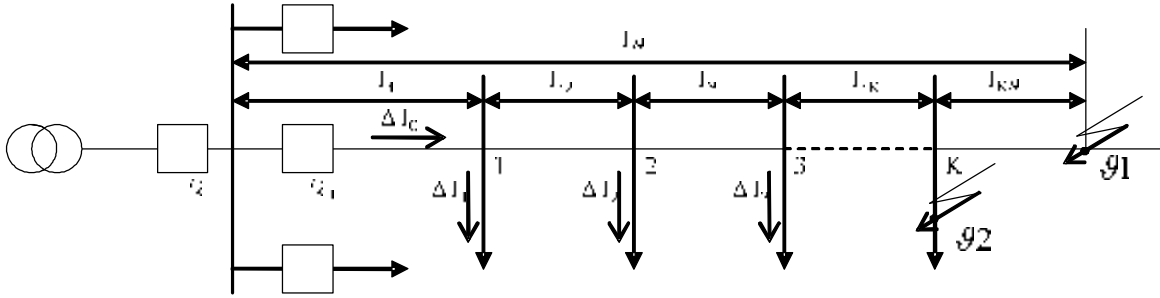


Рисунок 1 – Розрахункова схема мережі

де  $\zeta_{U_P} = \frac{dU_P}{U_P}$  – гранична відносна похибка визначення реактивної напруги петлі к.з.;

$\zeta_{I_{K3}} = \frac{dI_{K3}}{|I_{K3} - I_H|}$  – гранична відносна похибка ви-

значення струму к.з.;  $\zeta_{I_H} = \frac{dI_H}{|I_{K3} - I_H|}$  – гранична відносна похибка визначення струму навантаження;

$\zeta_{X_{\Pi}} = \frac{dX_{\Pi}}{X_{\Pi}}$  – гранична відносна похибка

визначення реактивної складової питомого опору.

Для оцінки можливих значень похибки методу скористаємось результатами аналізу типової схеми розподільної мережі з відгалуженнями, що зображена на рис. 1.

При виникненні двофазного к.з. на магістральній лінії, що виконана провідниками різного перетину, в точці  $J_1$  між фазами В і С напруга на шинах підстанції буде становити:

$$U_{BC} = \sum_{i=1}^k Z_{\Pi i} I_i \Delta I_0 - \sum_{i=1}^{k-1} \left[ \Delta I_i \left( \sum_{j=i+1}^k Z_{\Pi j} I_j \right) \right], \quad (4)$$

де  $\Delta I_0 = I_B - I_C$  – різниця струмів в пошкоджених фазах на початку мережі;  $\Delta I_i = (I_B - I_C)_i$  – різниця струмів в пошкоджених фазах за і-им вузлом;  $i = 1, 2, \dots, k-1$ ;  $j = 2, 3, \dots, k-1$ ;  $k$  – номер відгалуження;  $l_1, l_2, \dots, l_{k\vartheta 1}$  – довжина ділянок магістральної лінії між вузлами та останнім вузлом мережі перед точкою к.з. і самою точкою к.з.;  $Z_{\Pi i}$  – питомий опір і-ої ділянки мережі (Ом/км).

При цьому  $\Delta I_0 = \Delta I_{\vartheta 1} + \sum_{i=1}^k \Delta I_i$ , де  $\Delta I_{\vartheta 1}$  – комплекс величини струму короткого замикання. Тоді повний опір лінії до місця к.з. можна визначити як:

$$Z_B = \frac{U_{BC}}{\Delta I_0} = \sum_{i=1}^k Z_{\Pi i} l_i - \sum_{i=1}^{k-1} \left[ \frac{\Delta I_i}{\Delta I_0} \left( \sum_{j=i+1}^k Z_{\Pi j} l_j \right) \right]. \quad (5)$$

Виділимо реактивну складову повного опору:

$$x_B = \sum_{i=1}^k x_{\Pi i} l_i - \sum_{i=1}^{k-1} p_i \left\{ \left( \sum_{j=i+1}^k r_{\Pi j} l_j \right) \sin(\phi_i - \phi_0) + \left( \sum_{j=i+1}^k x_{\Pi j} l_j \right) \cos(\phi_i - \phi_0) \right\} \quad (6)$$

де  $\sum_{i=1}^k x_{\Pi i} l_i$  – сумарний опір від початку лінії до то-

чки  $\vartheta 1$ ;  $p_i = \frac{I_{mi}}{I_{m0}}$ , при  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ;

$\Delta I_i = I_{mi} \cdot e^{j\phi_i}$ ;  $\Delta I_0 = I_{m0} \cdot e^{j\phi_0}$ .

Для к.з. на відгалуженні по аналогії з попереднім випадком запишемо:

$$x'_B = \sum_{i=1}^k x_{\Pi i} l_i + x_{\Pi k \vartheta 2} l_{k \vartheta 2} - \sum_{i=1}^{k-1} \left\{ p'_i \sin(\phi_i - \phi_0) \left( \sum_{j=i+1}^k r_{\Pi j} l_j \right) - \sum_{i=1}^{k-1} \left\{ p'_i \cos(\phi_i - \phi_0) \left( \sum_{j=i+1}^k x_{\Pi j} l_j \right) - p'_k r_{\Pi k \vartheta 2} l_{k \vartheta 2} \sin(\phi_k - \phi_0) - p'_k x_{\Pi k \vartheta 2} l_{k \vartheta 2} \cos(\phi_k - \phi_0) \right\} \right\} \quad (7)$$

де  $\Delta I_0 = \Delta I_{\vartheta 2} + \sum_{i=1}^k \Delta I_i$ ;  $p'_i = \frac{I_{im}}{I_{om}}$ ;  $p'_k = \frac{I_{km}}{I_{om}}$ .

Дані співвідношення справедливі для будь-яких видів к.з., тому що омметр підключається на різницю фазних струмів і реактивну складову напруги петлі к.з. Це забезпечує однакові умови вимірювання параметрів для усіх видів міжфазних коротких замикань [9].

На основі розрахунків за наведеними співвідношеннями можна отримати еквіструмові лінії на топографічній карті мережі. При порівнянні розрахованих даних із вимірними омметром можна зробити висновок про розташування місця пошкодження.

Значення навантаження по окремих ТП слід визначати на основі вимірювань або можна отримати із функцій миттєвості, що є середніми вірогіднісними характеристиками випадкового процесу  $\{I(t)\}$  зміни навантаження [6].

Для розрахованих значень визначають дисперсію  $DI_i(t_1)$  та середньоквадратичне відхилення  $\sigma(t_1)$  значень  $I(t)$ :

$$DI_i(t_1) = \int_{-\infty}^{\infty} [I_i(t_1) - I_{cp}(t_1)]^2 f(I, t_1) dI; \quad (8)$$

$$\sigma(t_1) = \sqrt{DI(t_1)}. \quad (9)$$

При цьому функція розподілу для групового навантаження визначається за одним вихідним графіком  $I(t)$ , що зафіксований за досить тривалий період часу  $T$ .

При визначенні місця міжфазного к. з. дистанційним методом додаткову похибку вносить не точне визначення первинних параметрів ліній електропередачі (ЛЕП). Розбіжність результатів розрахунку для промислових частот за експериментальними даними складає 15-20 % [7]. Це пов'язано з тим, що методики обчислень електромагнітних полів ЛЕП на початку минулого століття звелись до спрощеної теорії зворотного земляного проводу (ЗЗП, зосередженого струму на глибині  $D_3$  в землі), що моделювала однорідну лінію провід-земля еквівалентною двопровідною лінією з такою відстанню між проводами, щоб її опір дорівнював опору вихідної однопровідної лінії. Ця теорія є досить простою та наглядною і за умов відсутності розвинених обчислювальних засобів знайшла широкого застосування. Розраховані за нею параметри є усередненими і можуть задовольняти вимоги до розрахунку параметрів нормального і аварійного режиму для відлаштування засобів релейного захисту, однак, не задовольняють вимогам точності при обчисленні місць замикань за параметрами аварійного режиму (ПАР). Вирішенням даної задачі можуть стати експериментальні визначення первинних параметрів ЛЕП, більш точний аналіз електромагнітного поля лінії на основі пошуку розв'язку рівнянь Максвелла або моделювання в сучасних прикладних програмах, наприклад, FEMLAB.

В [7] встановлено, що первинні параметри є характеристиками ближньої зони електромагнітного поля ЛЕП і повинні визначатись в моделі нескінченно довгого проводу.

Наприклад, реактивний опір лінії провід-земля (ПЗ) можна визначити за виразом Ом/км:

$$x = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_{екв}} + \frac{1}{\pi h n \gamma} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{n}{n+1} \right)^m \cdot \frac{v_m'^2}{b_m}, \quad (7)$$

де  $\frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_{екв}}$  – індуктивний опір лінії ПЗ в припущенні ідеальної провідності землі;

$\frac{1}{\pi h n \gamma} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{n}{n+1} \right)^m \cdot \frac{v_m'^2}{b_m}$  – додатковий індуктивний опір, що вноситься в лінію ПЗ неідеально провід-

ною землею;  $v'_m = \frac{\lambda_m}{\sqrt{2r_0}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + (\omega\mu\gamma)^2 \left( \frac{r_0}{\lambda_m} \right)^4}}$ ;

$$n = \frac{r_0}{\pi h} \left[ a - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{ar_0}{ar_0 + 2\pi h} \right)^m (\lambda_m J_1(\lambda_m))^{-1} \right];$$

$$a = \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_m J_1(\lambda_m))^{-1}; \quad b_m = \frac{\omega\mu\gamma}{2v'_m} + \frac{2v_m'^3}{\omega\mu\gamma}; \quad \lambda_m - \text{до-}$$

датні корені функції Бесселя першого роду нульового порядку;  $J_1$  – функція Бесселя першого роду першого порядку;  $r_0$  – радіус кривизни ПЛ;  $r$  – радіус проводу ПЛ.

Знайдені параметри за даною формулою відрізняють від результатів експериментів лише на 4 %.

Іншим видом пошкодження є замикання на землю однієї фази. Струм, що протікає при цьому є незначним, а міжфазні напруги лишаються без змін. В цьому випадку пошкоджена лінія у більшості випадків не відключається, але працює сигналізація замикання на землю.

Для визначення відстані до місця однофазного замикання на землю (ОЗЗ) пропонується метод, що ґрунтується на штучному замиканні непошкодженої фази повітряної лінії через резистор. Коли виникає ОЗЗ на іншій фазі, то вимірюється реактивний опір петлі, що утворюється дротом пошкодженої фази, місцем ОЗЗ і опором в місці штучного замикання на землю непошкодженої фази лінії на відстанці.

Для обчислення параметрів режиму однофазного замикання на землю (ОЗЗ3) використано метод симетричних складових. Для схеми рис. 2 граничні умови записано наступним чином:

$$\mathcal{I}_{AKC}^{(1.1)} = 0; \quad \mathcal{I}_{СКВ}^{(1.1)} = 0; \quad \mathcal{I}_{BKВ}^{(1.1)} = \mathcal{I}_{СКC}^{(1.1)}.$$

Для особливої фази А отримано:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{I}_{BKВ}^{(1.1)} &= \mathcal{I}_{B2KВ}^{(1.1)} = \mathcal{I}_{B0KВ}^{(1.1)}; \\ \mathcal{I}_{CKC}^{(1.1)} &= \mathcal{I}_{C2KC}^{(1.1)} = \mathcal{I}_{C0KC}^{(1.1)}; \\ \mathcal{I}_{BKВ}^{(1.1)} &= 3\mathcal{I}_{0KВ}^{(1.1)}; \\ 3\mathcal{I}_{0KВ}^{(1.1)} &= -\mathcal{I}_{CKC}^{(1.1)}; \\ 3\mathcal{I}_{0KВ}^{(1.1)} &= -3\mathcal{I}_{0KC}^{(1.1)}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де  $\mathcal{I}_{BKВ}^{(1.1)}$ ,  $\mathcal{I}_{B2KВ}^{(1.1)}$ ,  $\mathcal{I}_{B0KВ}^{(1.1)}$  – відповідно струми прямої, зворотної та нульової послідовності в фазі В до точки  $K_B$ ;  $\mathcal{I}_{CKC}^{(1.1)}$ ,  $\mathcal{I}_{C2KC}^{(1.1)}$ ,  $\mathcal{I}_{C0KC}^{(1.1)}$  – відповідно струми прямої, зворотної та нульової послідовності в фазі С до точки  $K_C$ .

Напруга петлі замикання на землю складає:

$$\mathcal{U}_{BC}^{(1.1)} = (Z_{Л0} + R_{пер}) \mathcal{I}_{B0}^{(1.1)} + (Z_{Л1} + R_{пер}) 2\mathcal{I}_{B0}^{(1.1)} - 3R_{шз} \mathcal{I}_{0KC}^{(1.1)}, \quad (9)$$

де  $Z_{Л0}$ ,  $Z_{Л1}$  – опори мережі до місця ОЗЗ відповідно струму нульової і прямої послідовності;  $R_{пер}$

– перехідний опір в місці замикання на землю;  $R_{шз}$  – опір в місці шунтувального замикання на землю.

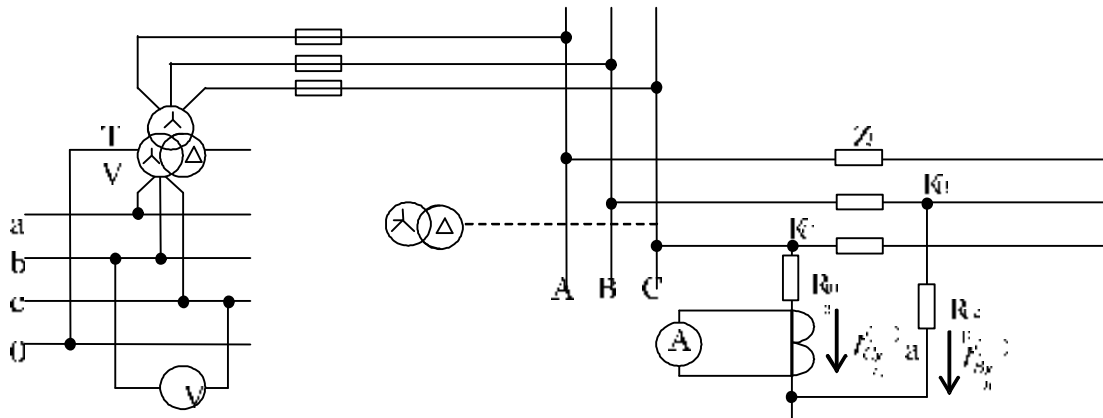


Рисунок 2 – Заступна схема для розрахунку струму подвійного замикання на землю

Із системи (8) та рівняння (9) видно, що:

$$I_{OKB}^{(1.1)} = -I_{CKC}^{(1.1)} = \frac{I_{BC}^{(1.1)}}{Z_{Л0} + 2Z_{Л1} + 3(R_{пер} + R_{шз})}$$

Реактивний опір до місця ОЗЗ:

$$X_{ЗКВ}^{(1.1)} = 2X_{Л1} + X_0$$

В залежності від повноти і точності вхідної інформації результатом використання дистанційного методу ВМП може бути або відстань від шин підстанції до точки к.з. або зона, в якій вона може знаходитись.

В якості резервного методу визначення пошкодженої ділянки доцільним є використання методу послідовного ділення мережі (МПДМ).

Для МПДМ використовується два критерії оптимізації процедури пошуку в залежності від виду пошкодження: недовідпустка електроенергії та втрати часу на пошук пошкодженої ділянки, тобто:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i \rightarrow \min; \tag{3}$$

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n t_i P_{Bi} \rightarrow \min,$$

де  $t_i$ ,  $W_i$  – відповідно проміжок часу, коли лінія залишається відключеною та недовідпустка електроенергії за цей час на  $i$ -му кроці пошуку;  $P_{Bi}$  – величина навантаження, що відключається на  $i$ -му кроці;  $n$  – кількість ділянок РМ.

Для міжфазних коротких замикань критерієм вибору перевірок є недовідпустка електроенергії, так як в будь-якому випадку захист спрацює на відключення лінії від живлення. Для ОЗЗ використовується критерій мінімізації часу пошуку, оскільки даний режим, згідно з діючою нормативною документацією, може існувати в лінії до 6 годин.

Для кожної окремої лінії будується таблиця покриття, що відображає можливості визначення по

шкодження на кожному окремому кроці процесу пошуку пошкодження для усієї сукупності можливих станів лінії. Так як поставлена задача є багатокроковою, то її представлено орієнтованим графом типу дерева. Початкові та внутрішні вершини дерева рішень є кроками процедури, а дуги – допустимі варіанти можливих рішень.

Кінцевий алгоритм подається у вигляді умовної моделі, що дозволяє врахувати можливості підключення додаткових джерел живлення до відключеної частини мережі на кожному кроці.

Оптимальна послідовність перевірок при ВМП за МПДМ попередньо розраховується для кожної повітряної мережі за розробленою в середовищі Delphi 6 програмою і виводиться у вигляді умовного алгоритму послідовності операцій. При цьому враховується можливість підключення резервних джерел живлення в процесі пошуку пошкодження.

За описаним алгоритмом розроблено прикладну програму у середовищі Delphi. Загальна блок-схема програми наведена на рис. 3.

Описаний принцип реалізовано у вимірювально-обчислювальній системі на основі аналогового вимірювального омметра [8, 10], мікропроцесора та інтерфейса персонального комп'ютера (ПК). На рис. 4 зображена структурна схема системи.

Ключовим елементом системи є аналого-цифровий перетворювач вхідного сигналу (АЦП), завдяки якому реалізовано зв'язок первинних вимірювальних перетворювачів із ПК. Сучасні плати АЦП можуть бути як зовнішніми, так і вбудованими в ПК.

Більшість таких перетворювачів мають можливості завантаження в плати програм користувача, що дозволяє виконувати обробку сигналів та видачу команд керування без використання ресурсів центрального процесора, однак, більша частина збору даних вирішується на рівні ПК із використанням драйверів у середовищах Delphi, C++ та ін.

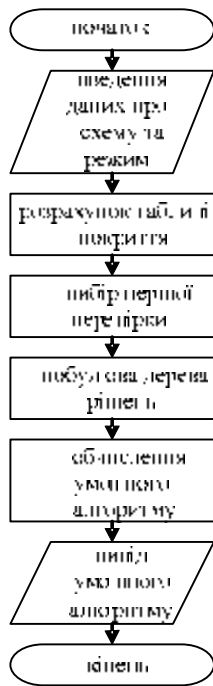


Рисунок 3 – Блок-схема програми розрахунку оптимальної послідовності перевірок для МПДМ

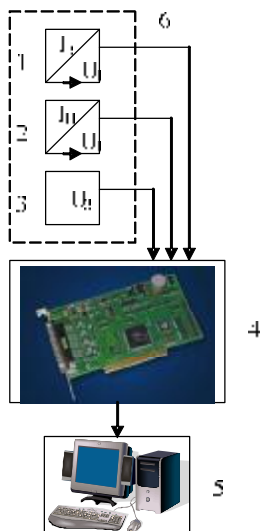


Рисунок 4 – Структурна схема вимірювально-обчислювальної системи:

- 1 – перетворювач струму короткого замикання;
- 2 – перетворювач струму нормального режиму;
- 3 – перетворювач напруги аварійного режиму;
- 4 – АЦП; 5 – ПК; 6 – вимірювальний омметр

**Висновок.** Через значну неоднорідність РМ найбільш прийнятним методом, що дозволяє автоматизувати процес ВМП, є дистанційний.

В разі використання динамічної характеристики системи, вдосконалення методів дистанційного визначення місця пошкодження в повітряній РМ можливо здійснити шляхом фіксації параметрів доаварійного та аварійного режиму на кожному присланні та оптимізації структури самої інформаційно-вимірювальної системи.

При використанні дистанційних методів в РМ слід враховувати їх неоднорідність (неврахування призводить до значних похибок). Первинні параметри ЛЕП слід визначати на основі детального аналізу їх електромагнітного поля або на основі експерименту. Визначення розподілу навантаження по довжині лінії дозволяє враховувати реальний режим роботи мережі для моменту виникнення пошкодження.

В разі керування процесом пошуку несправностей у системі електропостачання важливим є не стільки факт виявлення несправності, скільки визначення оптимальної стратегії використання системи в різних умовах її експлуатації. Пошук несправності передбачає не тільки установлення її місця, але й визначення стратегії відновлення системи шляхом усунення несправності за допустимий по умовам експлуатації час, або вмикання резерву і переходом на інші варіанти керування. Тому проблему оптимізації процесу пошуку необхідно розглядати з позиції ранжування інформаційно і енергетично взаємопов'язаних елементів системи електропостачання, що діагностується.

Комбінація вдосконалених дистанційних, топографічних методів та методу послідовного ділення мережі дозволяє створити універсальну програму пошуку, яка забезпечує вибір оптимальної стратегії при різних видах пошкоджень, умовах експлуатації і засобах контролю.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Айзенфельд А.И., Шалыт Г.М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.: ил.
2. Арцишевский Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью: Учеб. пособие для ПТУ. – М.: Высш. шк., 1989. – 87 с.; ил.
3. Авторское свидетельство СССР № 2857923/24-21, МКИ G01 R 31/08, 07.03.82
4. Авторское свидетельство СССР № 4113695/24-21, МКИ G01 R 31/08, 30.01.88
5. Авторское свидетельство СССР № 2809160/24-21, МКИ G01 R 31/08, 07.08.81
6. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Степанов В.П. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.
7. Макаров В.М. Первичные параметры линий электропередачи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 1976.
8. Кутін В.М., Луцяк В.В. Дистанційний метод визначення місця міжфазного короткого замикання в розподільній мережі 6-35 кВ з повітряними лініями електропередачі // Вісник КДПУ. Випуск 3/2006 (38). Частина 2. – С. 75-76.
9. Шнеерсон Э. М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
10. Кутін В.М., Вашковський В.В. Інформаційно-вимірювальна система визначення місця пошкодження в розподільних мережах змінного струму напругою 6-35 кВ // Вісник ВПІ – 2000 - №5 – С. 24-31.

Стаття надійшла 12.04.2008 р.