

## АВТОМАТИЧНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ВИДУ УЗЕМЛЕННЯ ФАЗИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ ТА КОМПЕНСОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

Базилевич М.В., Сабадаш І.О., Шелепєть Т.М.

Національний університет "Львівська політехніка",

Інститут енергетики та систем керування, кафедра ЕСМ, вул. Ст. Бандери 28А,  
кімн. 308, м. Львів, 79013

Тел: (0322) 398-500, E-mail: mik\_398500@yahoo.com

*This paper describes the algorithm of type damaging recognition in electrical network.*

Багаточисельні спроби створення універсального селективного захисту мереж з ізолюованою нейтраллю не увінчалися успіхом [1]. Причиною цього є різноманітність і складність процесів, що мають місце під час уземлення фази. Моделювання цих процесів з врахуванням всіх факторів навіть на сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки є складною задачею. Особливо складно моделювати електричну дугу. Але перевірити адекватність моделі можна тільки під час проведення експериментів в електричній мережі, коли на напруги та струми впливають всі фактори. Маючи осцилограми напруг та струмів реальних пошкоджень, стає можливим перевірити роботу захистів від замикань на землю. Крім цього є можливість проаналізувати причини неселективної роботи захистів.

У 1999-2002 рр. проводилось осцилографування пошкоджень в мережах 10 кВ "Львівобленерго" та "Закарпаттяобленерго". Осцилографування проводилось цифровими осцилографами. Записувались значення фазних напруг, напруги нульової послідовності  $3U_0$ , струмів нульової послідовності  $3I_0$ . Напруги подавались від трансформатора напруги типу НТМИ-10-66, струми подавались від трансформаторів струму нульової послідовності. Осцилограми записувались із частотою дискретизації 39 відліків за період промислової частоти; частотний діапазон вхідних сигналів 10-400 Гц. Цифрові осцилографи працювали в режимі очікування. Якщо напруга нульової послідовності перевищувала значення уставки  $3U_{\text{дуст}}$ , то записувалась осцилограма тривалістю 2 с. Після чого прилад знову переходив в режим очікування. Для аналізу осцилограми переносились на персональний комп'ютер, де вони тестувались спеціальним програмним забезпеченням.

Моделювання роботи захистів з використанням вхідної інформації ( $3U_0$ ;  $3I_0$ ) підтвердило неефективність захистів, що працюють за традиційними алгоритмами. Як і описано в літературі [1], найбільш надійними є захисти, що контролюють спрямування струмів нульової послідовності. Вони правильно працюють під час замикання через перехідний опір або двополярну дугу. Захисти, що використовують інформацію про спрямування струмів нульової послідовності в перший момент перехідного процесу під час замикання на землю є неефективними: на їх роботу негативно впливають високий рівень імпульсних завад, сильні спотворення форми напруги та струму нульової послідовності, великий розкид параметрів напруги та струмів нульової послідовності (навіть під час замикання в мережі з незмінною конфігурацією).

Більшість мікропроцесорних систем захисту від уземлення фази селективно визначають пошкоджене приєднання лише під час замикання через двополярну дугу або під час замикання через перехідний опір. Це можна пояснити тим, що мікропроцесорні системи використовують алгоритми, що розроблені для побудови захистів на електромеханічних або електронних елементах. Застосування нових сучасних алгоритмів, що обробляють вхідну інформацію з врахуванням статистичних даних, параметрів доаварійного і післяаварійного режимів, адаптовані для конкретної мережі дозволило б створити селективні захисти.

Аналіз статистики замикань на землю в мережах 10 кВ вказав на те, що захист в першу чергу повинен селективно працювати під час однополярної перекидної дуги. Створення захистів, що селективно працюють під час замикання на землю через перехідний опір або двополярну дугу не становить труднощів. Основною причиною неселективної роботи захистів під час однополярної перекидної дуги є те, що напруга нульової послідовності  $3U_0$  має значне коливання амплітуди, широкий спектр гармонік, що змінюється в часі та форму, що може бути помилково ідентифікована як спотворена синусоїда.

Для селективної роботи захистів необхідно розпізнавати характер замикання на землю. Це дозволить застосовувати різні алгоритми для різних видів замикань на землю. Найбільш доцільно визначати характер замикання на землю за формою  $3U_0$ . Експертними дослідженнями встановлено, що спеціаліст легко може визначити тип пошкодження за осцилограмою. Отже можна виділити характерні ознаки кожного пошкодження.

Всі зареєстровані пошкодження було розділено на три групи, в залежності від форми напруги нульової послідовності  $3U_0$ :

- замикання на землю через перехідний опір;
- замикання через двополярну дугу;

•замикання через однополярну перекидну дугу.

Осцилограми напруги нульової послідовності  $3U_0$  для цих пошкоджень показано на рис. 1.

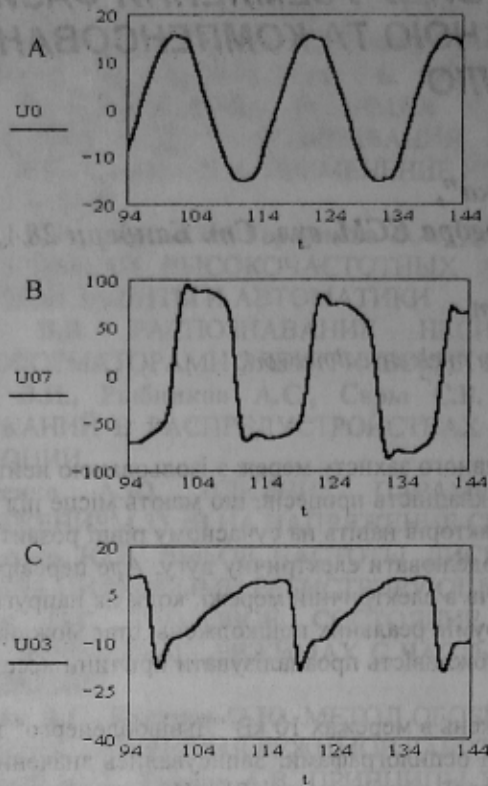


Рис. 1. Осцилограми напруги нульової послідовності під час замикання через перехідний опір (А), , через двополярну дугу (В), однополярну перекидну дугу (С). Час в мс, напруга на вторинній стороні трансформатора напруги у В (для В) і у кВ (А і С)

пруги нульової послідовності двох сусідніх періодів відрізняються. Тому було вирішено використовувати всю сукупність ознак для надійного визначення виду пошкодження. Але необхідно спростити алгоритм системи розпізнавання виду пошкодження та підвищити його швидкість, бо планується використовувати його в режимі реального часу в складі системи захисної автоматики. Тому для кожного виду пошкодження було виділено мінімальний набір основних характерних ознак, користуючись яким можна визначити вид пошкодження.

Для замикання через однополярну дугу таким мінімальним набором ознак є:

- різниця тривалості додатньої та від'ємної півхвиль не повинна бути меншою від 1 мс;
- відношення амплітуд додатньої та від'ємної півхвиль напруги  $3U_0$  повинно бути не менше 1,5.

Для замикання через перехідний опір:

- різниця між тривалістю додатньої та від'ємної півхвилі повинна бути меншою від 1 мс;
- відношення амплітуд додатньої та від'ємної півхвиль не повинно перевищувати 1,3;
- відношення амплітуди додатнього значення напруги нульової послідовності  $3U_0$  до амплітудного значення першої похідної від  $3U_0$  знаходиться в межах 1,9÷3,5 мс;

• перша похідна лише двічі змінює свій знак протягом періоду промислової частоти.

Для замикання через двополярну дугу:

- різниця між тривалістю додатньої та від'ємної півхвилі повинна бути меншою 1 мс;
- відношення амплітуд додатньої та від'ємної півхвиль не повинно перевищувати 1,5;
- відношення амплітуди додатнього значення напруги нульової послідовності  $3U_0$  до амплітудного значення першої похідної від  $3U_0$  знаходиться в межах 0,7÷2,3 мс;
- перша похідна змінює свій знак 2÷8 раз протягом періоду промислової частоти;
- максимум настає протягом 1÷2,6 мс після переходу напруги  $3U_0$  через нуль (для додатньої або від'ємної півхвилі).

Для застосування всієї сукупності ознак було використано елементи теорії нечітких множин та теорії ймовірності.

На основі статистичних даних значення характерних ознак  $x_1 \div x_5$  нелінійно перетворювались у коефіцієнт впливу  $K$  за допомогою нелінійної функції перетворення  $F(x)$ :

$$K_{ij} = F_{ij}(x_i), \quad (1)$$

Було проаналізовано осцилограми кожної групи з метою виділити найбільш характерні ознаки форми напруги нульової послідовності. Бажано, щоб ці ознаки не залежали від амплітуди та частоти напруги нульової послідовності. Також ці ознаки мають бути зручними для роботи цифрових систем захисту.

Такими ознаками є:

- співвідношення між амплітудними значеннями додатньої і від'ємної півхвиль  $3U_0$ ;
- тривалість додатньої та від'ємної півхвилі напруги нульової послідовності  $3U_0$ ;
- кількість змін знаку першої похідної напруги нульової послідовності протягом одного періоду промислової частоти;
- час досягнення напругою нульової послідовності свого амплітудного значення (додатнього чи від'ємного) після переходу кривої через нуль;
- відношення амплітудного додатнього значення напруги нульової послідовності  $3U_0$  до амплітудного додатнього значення першої похідної  $3U_0$  (або амплітудного від'ємного значення напруги  $3U_0$  до амплітудного від'ємного значення першої похідної).

Ці характерні ознаки використано для реалізації алгоритму розпізнавання форми напруги  $3U_0$ , а отже й виду замикання на землю.

Складність розпізнавання виду пошкодження полягає в тому, що параметри напруги нульової послідовності залежать від багатьох факторів. Ці фактори змінюються протягом всього часу існування пошкодження, тому навіть для того самого пошкодження миттєві значення на-

де  $K_j$  – коефіцієнт впливу значення ознаки  $x_i$  для  $j$ -того виду пошкодження, %;

$F_{ij}$  – функція перетворення значення ознаки  $x_i$  для  $j$ -того виду пошкодження;

$x_i$  – значення  $i$ -тої ознаки.

Ймовірність певного виду пошкодження обчислюється як сума коефіцієнтів впливу для даного виду пошкодження:

$$K_j = \sum_{i=1}^n K_{ij} = \sum_{i=1}^n F_{ij}(x_i), \quad (2)$$

де  $K_j$  – ймовірність  $j$ -того виду пошкодження, %;

$n$  – кількість характерних ознак в кожному наборі.

Для кожного виду пошкодження було сформовано свої набори характерних ознак та функцій перетворення  $F(x)$ . Тому для випадку замикання через однополярну дугу, замикання через перехідний опір або замикання через двополярну дугу ймовірність пошкодження, відповідно, буде визначатись за формулами:

$$K1 = F1(x1) + F2(x2). \quad (3)$$

$$K2 = F3(x1) + F4(x2) + F5(x3) + F6(x4). \quad (4)$$

$$K3 = F3(x1) + F7(x2) + F8(x3) + F9(x4) + F10(x5) \quad (5)$$

З трьох значень  $K1$ ,  $K2$  і  $K3$  визначається найбільше – це і буде найбільш ймовірним видом пошкодження. Якщо за якогось набору ознак значення  $K$  перевищує 90%, то можна одразу зробити однозначний висновок про вид пошкодження. Якщо ймовірність будь-якого пошкодження не перевищує 60% то вважаємо, що пошкодження не можна розпізнати. Це дозволяє уникнути помилки під час розпізнавання не досліджених видів пошкоджень. Загальний алгоритм розпізнавання виду пошкодження подано на рис. 2.

Значення ознак шукають за формулами:

$$x1 = |t^+ - t^-|; \quad (6)$$

$$x2 = \frac{3U_{0max}^+}{3U_{0max}^-}; \quad (7)$$

$$x3 = \frac{3U_{0max}^+}{\left(\frac{d}{dt}(3U_0)\right)_{max}^+}; \quad (8)$$

де  $t^+$   $t^-$  – тривалість відповідно додатньої та від'ємної півхвилі, мс;

$3U_{0max}^+$ ,  $3U_{0max}^-$  – амплітудне додатнє та амплітудне від'ємне значення напруги  $3U_0$ , В.

$\left(\frac{d}{dt}(3U_0)\right)_{max}^+$  – амплітудне значення першої похідної, В/мс;

$x4$  – кількість змін знаку першої похідної протягом періоду промислової частоти;

$x5$  – час настання максимуму напруги нульової послідовності після переходу  $3U_0$  через нуль, мс.

Діюче значення  $3U_{0д}$  шукають за формулою:

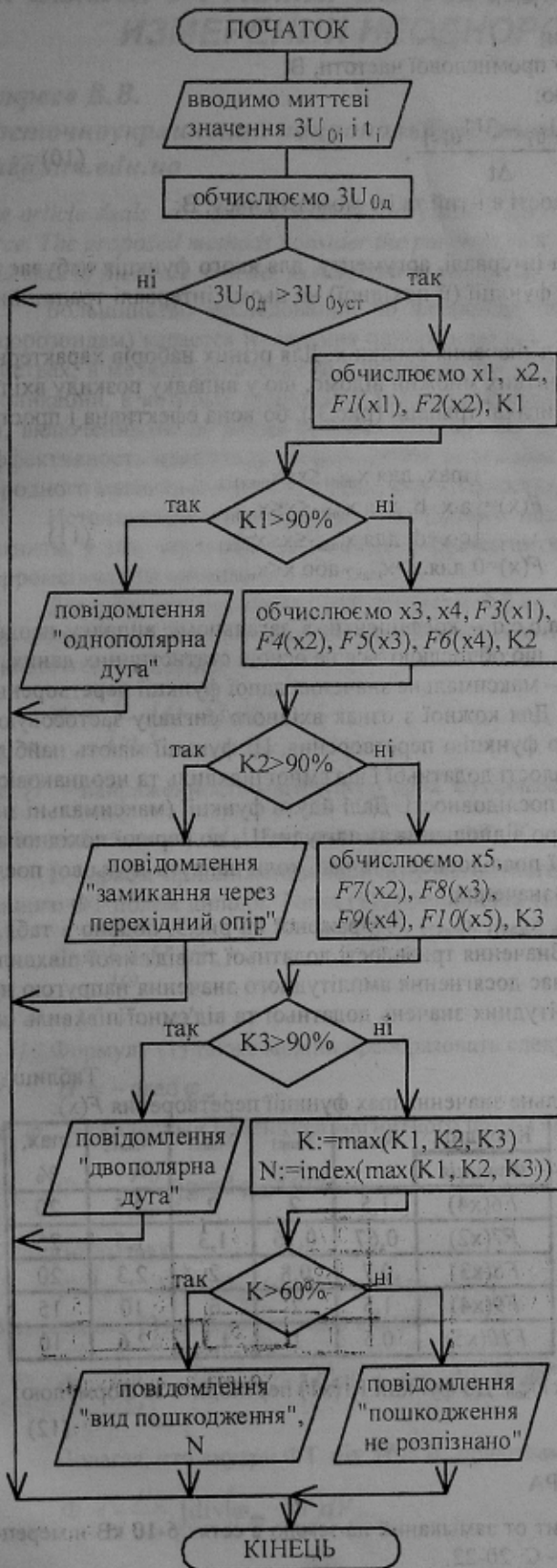


Рис. 2. Алгоритм роботи системи розпізнавання виду пошкодження.

$$3U_{0Д} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=i-N}^i 3U_{0j}^2} \quad (9)$$

де  $N$  - кількість відліків за період промислової частоти;

$3U_{0j}$  - миттєві значення напруги  $3U_0$  протягом періоду промислової частоти, В.

Першу похідна напруги  $3U_0$  обчислюють за формулою:

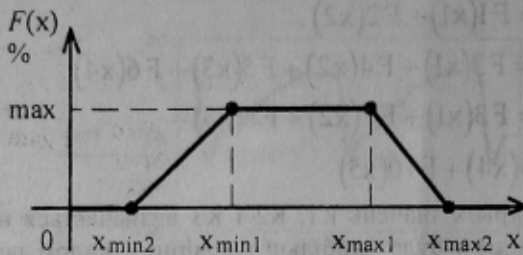
$$\frac{d}{dt}(3U_0) = \frac{3U_{0i} - 3U_{0i-1}}{\Delta t}, \quad (10)$$

де  $3U_{0i}$ ,  $3U_{0i-1}$  - значення напруги нульової послідовності в  $i$ -тий та  $i-1$  моменти часу, В;

$\Delta t$  - крок дискретизації, с.

Алгоритми пошуку амплітудного значення функції на інтервалі, аргументу, для якого функція набуває максимального значення, та підрахунку кількості змін знаку функції (її похідної) на цьому інтервалі традиційні й описані в літературі [2].

Функція перетворення  $F(x)$  є нелінійною і залежить від значення ознаки  $x$ . Для різних наборів характерних ознак застосовують різні функції перетворення. З теорії нечітких множин відомо, що у випадку розкиду вхідної інформації найкраще застосовувати нелінійну функцію у вигляді трапеції (рис.3.), бо вона ефективна і проста у реалізації. Така функція описується двома функціоналами:



$$F(x) = \begin{cases} \max, & \text{для } x_{\min1} \leq x \leq x_{\max1} \\ a \cdot x + b, & \text{для } x_{\min2} \leq x \leq x_{\min1} \\ c \cdot x + d, & \text{для } x_{\max1} \leq x \leq x_{\max2} \\ F(x) = 0 & \text{для } x > x_{\max2} \text{ або } x < x_{\min2}, \end{cases} \quad (11)$$

Рис.3. Функція перетворення  $F(x)$

де  $a, b, c, d$  - коефіцієнти, в загальному випадку неоднакові, що обчислюються на основі статистичних даних.

$\max$  - максимальне значення даної функції перетворення.

Для кожної з ознак вхідного сигналу застосовують свою функцію перетворення. Ці функції мають найбільше значення для найбільш "надійних" ознак :

різниця тривалості додатньої і від'ємної півхвиль та неоднаковість амплітуд додатніх та від'ємних півхвиль напруги нульової послідовності. Далі йдуть функції (максимальні значення яких зменшуються), що перетворюють інформацію про відношення амплітуди  $3U_0$  до першої похідної від  $3U_0$ , кількість змін знаку першої похідної напруги нульової послідовності та час, коли напруга нульової послідовності набуває максимального від'ємного або додатнього значення.

Значення координат функції перетворення ( $x_{\min2}$ ,  $x_{\min1}$ ,  $x_{\max1}$ ,  $x_{\max2}$ ), зображеної на рис.3, подано в табл.1. Коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$  обчислюють на основі цієї таблиці. Значення тривалості додатньої та від'ємної півхвиль, відношення амплітуди  $3U_0$  до першої похідної від  $3U_0$  та час досягнення амплітудного значення напругою нульової послідовності обчислюють в мс, а відношення амплітудних значень додатньої та від'ємної півхвиль обчислюють у відсотках.

Таблиця 1.

Значення координат  $x_{\min2}$ ,  $x_{\min1}$ ,  $x_{\max1}$ ,  $x_{\max2}$  та максимальне значення  $\max$  функції перетворення  $F(x)$ .

Координ.	$x_{\min2}$	$x_{\min1}$	$x_{\max1}$	$x_{\max2}$	$\max$ , %
Функція					
$F1(x1)_{\text{доп}}$	0,5	1	15	16	50
$F2(x2)$	1,5	2	6	7	50
$F3(x1)$	0	0	0,75	1	30
$F4(x2)$	0,76	0,83	1,2	1,3	30
$F5(x3)$	1,7	2	3,5	4	20

Координ.	$x_{\min2}$	$x_{\min1}$	$x_{\max1}$	$x_{\max2}$	$\max$ , %
Функція					
$F6(x4)$	1,5	2	2	2,5	20
$F7(x2)$	0,67	0,76	1,3	1,5	25
$F8(x3)$	0,7	0,8	2	2,3	20
$F9(x4)$	1,5	2	6	10	15
$F10(x5)$	0,5	1	1,5	2,6	10

Для швидкості обчислюється доповняльна функція  $F1(x1)_{\text{доп}}$ . До функції  $F1(x1)$  переходять за формулою:

$$F1(x1) = 50\% - F1(x1)_{\text{доп}} \quad (12)$$

#### ЛІТЕРАТУРА

[1] Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мереприятиях по их совершенствованию// Энергетик. - №1 - 2000. - С. 20-22.

[2] Обчислювальна техніка в електро-енергетичних розрахунках: Підручник/ За редакцією Перхача В.С. - Львів: Світ, 1992.-432 с.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Сивикобиленко В.Ф.