

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЛІНІЯХ СИГНАЛІЗАЦІЇ, ЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ТА АВТОБЛОКУВАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

Б.С. Стогній^{1*}, акад. НАН України, **М.В. Гребченко^{2**}**, докт.техн.наук, **В.Ф. Максимчук³**,
Ю.В. Пилипенко^{1*}**, канд.техн.наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: regina@regina.org.ua

² Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

³ Укрзалізниця,

вул. Тверська, 5, Київ-150, 03680, Україна.

Наведено подальший розвиток методу визначення місця замикання на землю на повітряних лініях сигналізації, централізації та автоблокування залізниць, запропонованого авторами й заснованого на дистанційному принципі. Показано, що нестационарна зміна параметрів режиму лінії суттєво ускладнює використання методу, через що його точність не завжди задовольняє вимогам. Узагальнено отриманий досвід об'єднання у методі одночасно трьох алгоритмів для визначення місця замикання відповідно для кожної фази лінії. З метою підвищення точності методу запропоновано вдосконалити його за рахунок введення додаткової операції уточнення значення вектору падіння напруги на опорі фази до місця пошкодження. Авторами раніше доведено, що у якості вхідних параметрів методу необхідно використовувати значення коригованих перших гармонік струмів та напруг, які визначаються за вимірними за допомогою трансформаторів струму та напруги. Проведено експерименти, що дають змогу оцінити підвищення точності вимірювання струмів за рахунок використання трансформаторів струму більш високого класу точності й вимірювання напруги за допомогою дільників з активних опорів. Проведено розрахункові дослідження з визначення значення ємностей, що включаються між кожною фазою лінії та землею для зменшення електромагнітного впливу на лінію, який виникає за рахунок близького розташування лінії два проводи-рейка та контактної мережі. Бібл. 8, табл. 4, рис. 2.

Ключові слова: місце замикання, експериментальні дослідження, математичне моделювання, вдосконалення методу, точність визначення.

Значна кількість методів визначення місця замикання на землю однієї фази ліній заснована на використанні так званого дистанційного принципу [1-5], тобто у цих методах подібно дистанційному захисту визначається опір до місця пошкодження й через нього визначається відстань до пошкодження. Вказаний опір розраховується на підставі вимірюного падіння напруги на опорі фази лінії до місця замикання та вимірюного струму фази лінії. Нестационарна зміна параметрів, що вимірюються в аварійному режимі замикання на землю лінії сигналізації, централізації та автоблокування (СЦБ) залізниць, вимагає використання складних методів визначення місця пошкодження, наприклад, [6]. Але точність визначення місця пошкодження у разі використання навіть цих складних методів не завжди задовольняє вимогам [6].

Тому автори поставили метою подовжити пошук заходів з підвищення точності визначення місця пошкодження та провести їхню оцінку й необхідні дослідження.

Нижче розглядається метод, який був представлений в [6, 7]. Вдосконаленню саме цього методу присвячено статтю. На рис. 1 наведено блок-схему умовно-інтелектуального методу визначення відстані замикання фази на землю. З нього видно, що визначення відстані до точки замикання виконується різними способами для кожної фази. У [6] доведено, що у алгоритмі необхідно використовувати кориговані значення струмів та напруг. Коригування амплітуди струмів та напруг виконується шляхом ділення амплітуд перших гармонік струмів та напруг на значення частки першої

гармоніки у повному значенні відповідного струму або напруги (тут і далі під «повним» значенням розуміється значення, в якому враховано усі гармоніки). Результати розрахунків відстані замикання з використанням коригованих та некоригованих значень параметрів режиму показують, що похибка визначення відстані може складати значно більше, ніж 10%. З метою зменшення діапазону запропоновано умовно-інтелектуальний метод визначення відстані замикання фази на землю, основою якого є автоматичний вибір способу розрахунку в залежності від фази лінії, в якій виникло замикання, від плинних значень частки першої гармоніки у напрузі пошкодженої фази (контролюється за допомогою допустимих значень $U_{1доп\,A}$, $U_{1доп\,C}$, $U_{1доп\,2\,C}$), а також з урахуванням результатів співставлення результатів визначення відстані за трьома способами (рис. 1). У фазі *B* досліджуваної лінії СЦБ залежність рівня першої гармоніки від відстані до місця замикання майже лінійна, а тому для фази *B* використовується тільки один спосіб розрахунку відстані (рис. 1).

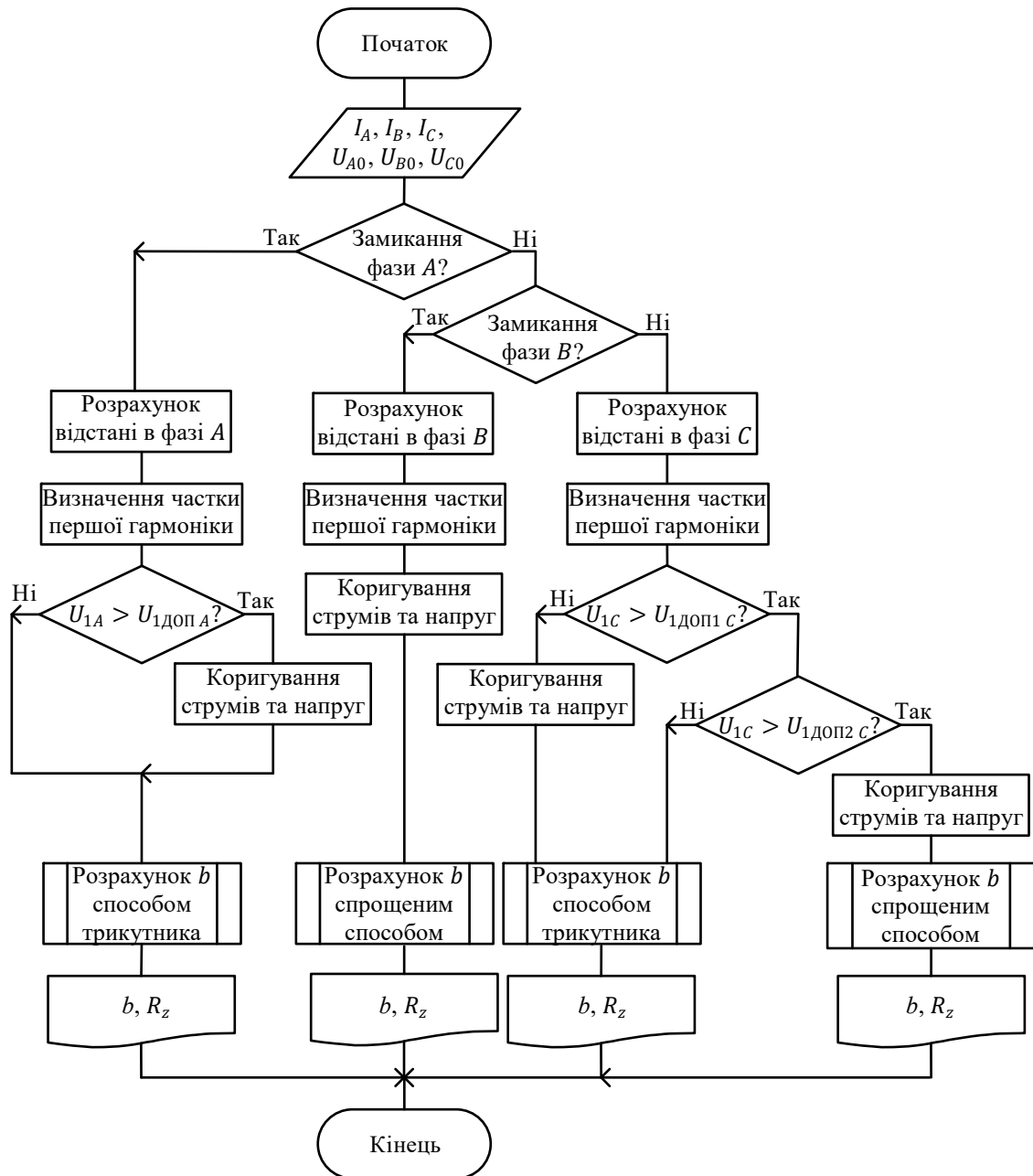


Рис. 1

На рис. 1 прийняті наступні позначення: $I_A, I_B, I_C, U_{A0}, U_{B0}, U_{C0}$ – дієві значення струмів та напруг фаз лінії, отримані шляхом перетворення їхніх аварійних миттєвих значень; b – відстань до місця замикання; $U_{1доп\,A}, U_{1доп\,C}, U_{1доп\,2\,C}$ – допустимі значення першої гармоніки напруг відповідно

фази A та фази C , що дозволяють врахувати нелінійність розподілу першої гармоніки відповідних напруг вздовж лінії, а конкретні допустимі значення обираються на підставі схеми розташування однофазних трансформаторів вздовж лінії або на підставі експериментальних даних; b_{rA}, b_{rB}, b_{rC} – розрахункові відстані до місця замикання відповідно фази A, B, C ; R_z – опір між фазою й землею у місці замикання. Спосіб, за яким відстань визначається на підставі ділення уявної частини вектору коригованої напруги пошкодженої фази на уявну частину вектору коригованого струму цієї фази, позначено як спрощений спосіб. Спосіб, за яким відстань визначається на підставі ділення модуля вектору падіння коригованої напруги пошкодженої фази, який визначено з трикутника векторів напруг (рис. 2), на модуль вектору коригованого струму цієї фази, названо як спосіб трикутника.

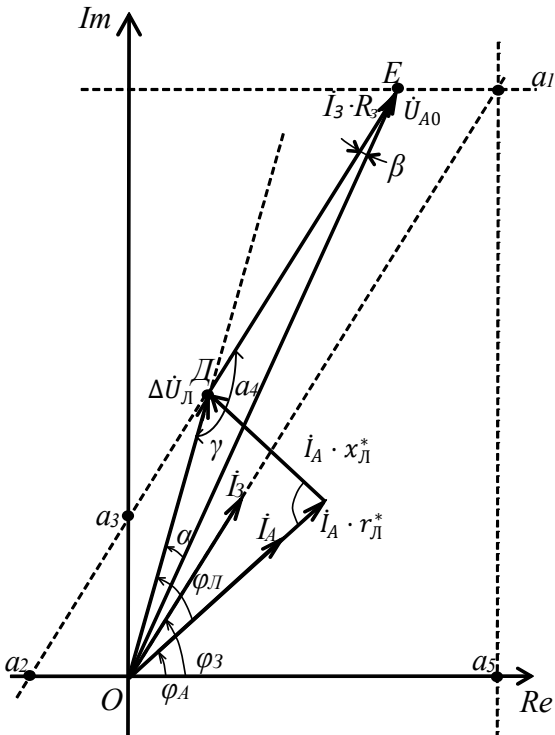


Рис. 2

З метою додаткового визначення причин виникнення похибки розрахунку відстані до місця замикання на лінії СЦБ проведено аналіз нових результатів експериментальних досліджень режимів замикання фази на землю лінії СЦБ на підстанції. Аналіз проведено за наступними напрямками:

– перевірка осцилограм на відповідність режиму (тобто у разі замикання фази A струм цієї фази повинен збільшитись, а напруга – зменшитись);

– візуальна перевірка форми струмів та напруг, їхніх періодичності та відхилення форми від синусоїди;

– оцінка результатів розрахунків відстані до місця замикання на підставі використання розробленого алгоритму, входними даними для якого приймалися параметри режимів, що отримані в експериментах (використовувались повні значення параметрів режиму або

їхні перші гармоніки);

– оцінка результатів математичного моделювання робочих режимів та режимів замикання на землю, що співпадають з умовами проведення експериментальних досліджень;

– візуалізація отриманих розрахункових та експериментальних даних у вигляді векторних діаграм і їхнє використання для додаткової перевірки правильності розрахунків відстані.

На підставі проведеного аналізу визначені найбільш ймовірні причини виникнення значної похибки результатів розрахунків відстані до місця замикання на лінії СЦБ. Усі причини умовно поділені на дві групи: традиційні та специфічні.

До традиційних причин віднесено:

а) недосконалість реалізації методу;

б) похибки вимірювання струмів фаз та напруг фаз по відношенню до землі;

в) наявність опору у місці замикання;

г) можлива неоднорідність параметрів лінії вздовж лінії СЦБ, що обумовлено різним виконанням лінії (тип та марка проводу, різне взаємне розташування проводів) та використання дільниць з кабелем.

Специфічні причини, притаманні повітряній лінії СЦБ:

а) відсутність розгалуженої мережі, із-за чого у разі замикання на землю виникають незначні зміни струмів, які є недостатніми для забезпечення необхідної точності вимірювання струмів;

б) навантаження лінії є неоднорідним (різна потужність та вид – однофазне та трифазне) й нерівномірно розподілене вздовж всієї лінії СЦБ;

в) електромагнітний вплив напруги лінії «два проводи-рейка (ДПР)», із-за чого наводяться напруги на кожній фазі лінії СЦБ і змінюються напруги фаз по відношенню до землі;

г) періодична зміна параметрів режиму замикання на землю усіх трьох фаз (струми та напруги фаз змінюються з періодом приблизно 0,75 секунди), що приводить до неоднозначних результатів розрахунків віддаленості місця замикання;

д) загальні порушення співвідношень кутів між струмами та напругами у різних фазах, а також амплітуд струмів та напруг (при замиканнях на однаковій відстані у різних фазах очікуються однакові співвідношення) у порівнянні з співвідношеннями, які мають місце у разі підключення до симетричної системи напруг живлення, а також неоднакові порушення співвідношень між параметрами фаз *A, B, C* (тобто порушення є у всіх фазах, але у разі замикань різних фаз вони відрізняються від іншої фази).

Зміна параметрів режиму відбувається, наприклад, таким чином: у фазі *C* на протязі 180 мс співвідношення між векторами струмів та напруг відповідають таким, які є у разі симетричного живлення і тому є можливість на підставі використання цих значень виконати розрахунок усередненого значення відстані; далі на протязі 220 мс вказане співвідношення не виконується, а потім на протязі 280 мс знову виконується співвідношення і далі знову можна визначати усереднене значення відстані за якийсь проміжок часу, оскільки у кожному розрахунку для нового значення часу значення відстані змінюється. Практичне використання такої зміни параметрів неприпустиме із-за неможливості визначення у конкретному випадку вказаних діапазонів й визначення проміжку часу, у якому будуть отримані результати, які відповідають дійсному місцю замикання, та визначення проміжку часу, у якому будуть отримані хибні результати.

Підключення ємностей до фаз лінії СЦБ призводить до збільшення струмів замикання, а також до поліпшення симетрії напруг фаз [5], що в цілому позитивно впливає на підвищення точності розрахунку відстані до місця замикання, але не усуває нестационарних змін параметрів режиму (необхідно відмітити, що у дослідях, які проведені раніше, також є нестационарні зміни параметрів режиму).

На підставі проведеного аналізу визначені наступні шляхи підвищення точності розрахунків відстані до місця замикання:

- вдосконалення запропонованого методу визначення відстані за рахунок заміни спрощеного перетворення векторів на більш точне перетворення;
- використання тільки перших гармонік струмів та напруг для визначення відстані;
- автоматичний вибір для розрахунків відстані таких ділянок (частин осцилограми) зміни параметрів режиму, коли кутові співвідношення між вектором струму пошкодженої фази, вектором напруги пошкодженої фази та вектором струму у місці замикання відповідають очікуваним при замиканні відповідної фази лінії (тобто отриманим на підставі математичного моделювання);
- використання дільників напруги, що виконані за допомогою активних опорів, замість електромагнітних вимірювальних трансформаторів напруги та доцільності використання трансформаторів струму більш високого класу точності;
- визначення усіх усереднених кутів та модулів векторів параметрів режиму відносно вектора напруги пошкодженої фази замість визначення кутів відносно вектора напруги фіксованої фази лінії;
- збільшення значення ємності з $2 \times 0,64$ мкФ до $3 \times 0,64$ мкФ або більше на фазу.

На підставі моделювання з використанням математичної моделі лінії СЦБ отримано оцінку методичної похибки запропонованого методу визначення відстані замикання фази на землю. Результати показали, що така похибка у найбільш ймовірних умовах замикання не перевищує 1%. Враховуючи це, було прийнято рішення про доцільність використання методу в реальних умовах. Моделювання проводилося за умови симетричної системи напруг живлення. Підключення трьох ємностей до фаз лінії СЦБ суттєво зменшує існуючу несиметричність і вирівнює напруги фаз по відношенню до землі, але не повністю. Залишкова несиметрія є одним із факторів впливу на точність визначення відстані до місця замикання.

У зв'язку з тим, що у запропонованому методі визначення відстані до місця замикання використовуються модулі векторів струмів та напруг, на точність визначення відстані впливають похибки розрахунків значень модулів та кутів векторів струмів й напруг. Щоб знайти найбільш досконалий спосіб визначення векторів на підставі обробки відповідних послідовностей дискретних значень параметрів режиму, які визначались в експериментах, розглянуто три варіанти виконання розрахунків (табл. 1). У всіх трьох варіантах вхідною інформацією є миттєві значення струмів й напруг, що отримані після аналого-цифрового перетворення вихідних значень вимірювальних трансформаторів струму (ТС) та напруги (рис. 1). Необхідність розгляду декількох варіантів обумовлена нестационарністю зміни параметрів режиму роботи лінії СЦБ.

Перший варіант. Для визначення векторів виконуються розрахунки діючих значень струмів та напруг, а також усереднених за 20 мс значень кутів напруг і струмів по відношенню до вектора напруги фази *A*. На підставі отриманих даних визначаються відповідні вектори.

Другий варіант. Визначаються перші гармоніки струмів та напруг, далі – діючі значення перших гармонік струмів, напруг і усереднені значення кутів та на підставі отриманих даних – вектори струмів і напруг по відношенню до вектора напруги фази *A*.

Третій варіант. Визначаються усереднені значення (за 20 мс) кутів між векторами струмів і напруг по відношенню до вектора напруги фази *A*. Для визначення векторів струмів та напруг використовуються миттєві значення повних струмів та напруг вимірювані кожної мілісекунди.

У разі аналізу режиму замикання на землю фази *A* вектори параметрів режиму визначаються по відношенню до вектора напруги фази *B*, що пов'язано із значним спотворенням напруги пошкодженої фази *A* (через мале значення напруги збільшується похибка вимірювання трансформатором напруги). Варіанти вхідних даних для визначення векторів струмів та напруг наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Варіант	Кути визначаються за:	Максимуми векторів визначаються за:
Перший варіант	діючими значеннями повних струмів та напруг	діючими значеннями повних струмів та напруг
Другий варіант	діючими значеннями перших гармонік струмів та напруг	діючими значеннями перших гармонік струмів та напруг
Третій варіант	діючими значеннями повних струмів та напруг	миттєвими значеннями повних струмів та напруг

На підставі співставлення результатів визначення векторів за варіантами табл. 1 попередньо прийнято рішення про доцільність використання другого варіанту.

У запропонованому методі відповідно до дистанційного принципу визначається опір до місця пошкодження через падіння напруги на пошкодженій ділянці [7]. Нижче розглядається послідовність операцій з підвищення точності розрахунку вектору падіння напруги на ділянці

лінії СЦБ за рахунок вдосконалення розрахунків векторів. На векторній діаграмі замикання фази *A* (рис. 2) трикутник *ОДЕ* створений трьома векторами напруги: сума складових вектору падіння напруги на опорі ділянки лінії *ОД* ($\dot{I}_A \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}^*$) та вектору падіння напруги на опорі у місці замикання *ДЕ* ($\dot{I}_3 \cdot R_3$) дорівнює вектору напруги фази по відношенню до землі *ОЕ* (\dot{U}_{A0}).

У методі [7] вектор падіння напруги на ділянці лінії СЦБ визначається за формулою, отриманою виходячи з теореми синусів для трикутника *ОДЕ*

$$\Delta \dot{U}_{\text{Л}} = \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}^* = \dot{U}_{A0} \frac{\sin \beta}{\sin \gamma},$$

з якої видно, що напрям вектору падіння напруги на опорі ділянки лінії такий же, як напрям вектору напруги \dot{U}_{A0} . Кут α має мале значення, але не врахування цього кута є причиною похибки визначення відстані.

Проблема полягає в тому, що на підставі наявних даних не має можливості прямо визначити вектор падіння напруги $\Delta \dot{U}_{\text{Л}}$, але є можливість визначити координати точки перетину вектору падіння напруги на активному опорі замикання R_3 (співпадає з напрямом вектору струму замикання \dot{I}_3) та вектором падіння напруги на опорі лінії $\Delta \dot{U}_{\text{Л}}$ (напрямок вектору падіння напруги визначається через напрям вектору струму фази \dot{I}_A та параметри лінії). Для усунення складової похибки визначення вектору $\Delta \dot{U}_{\text{Л}}$, яка виникає у цьому випадку, розроблено алгоритм врахування кута α , що забезпечує визначення вектору падіння напруги $\Delta \dot{U}_{\text{Л}}$. Напрямок цього вектору відповідає напрямку вектору падіння напруги на опорі лінії, а не співпадає з напрямом вектору напруги \dot{U}_{A0} . На рис. 2 на площині комплексних координат наведена векторна діаграма струмів та напруг у разі замикання на землю фази *A* (вісь дійсних значень суміщається з віссю *x* декартової системи координат, вісь уявних значень – з віссю *y* декартової системи координат).

Задача полягає у знаходженні координат точки *D*, яка утворюється внаслідок перетину вектора падіння напруги на ділянці лінії $\Delta \dot{U}_{\text{Л}}$ і вектора падіння напруги на перехідному опорі у місці замикання $\dot{I}_3 \cdot R_3$. Для цього використовується метод координат на площині та деякі дії виконуються з векторами, що задані координатами. Спочатку записуються рівняння прямих $Y_1 = f(\text{Re}(\dot{I}_3 \cdot R_2))$ та

$Y_2 = f(\operatorname{Re}(\Delta \dot{U}_L))$. Координати точки D перетину цих двох прямих задовольняють обидва рівняння. Внаслідок розв'язання системи з двох рівнянь визначаються координати кінця вектора $\dot{I}_A \cdot \underline{Z}_L^*$. Координати допоміжних точок a_1, a_2, a_3, a_4 та a_5 записуються як звичайні координати для i -тої точки $a_i(x_i, y_i)$.

На підставі вимірної напруги пошкодженої фази A по відношенню до землі \dot{U}_{A0} необхідно визначити вектор падіння напруги $\Delta \dot{U}_L$ на ділянці лінії від її початку до точки замикання, тобто вектор OD , який є стороною трикутника EDO . Трикутник спирається на вектор напруги \dot{U}_{A0} . Друга сторона трикутника розташована на прямій лінії, що співпадає з напрямком вектору падіння напруги на опорі лінії СЦБ $\Delta \dot{U}_L$. Цей напрям визначається шляхом додавання до кута вектору струму φ_{1A} кута лінії $\varphi_{\text{ЛНН}} = 23,75^\circ$ (відношення індуктивного до активного опору лінії дорівнюється тангенсу кута лінії, який визначено для реальних значень активного й індуктивного опору досліджуваної лінії СЦБ). Напрямок третьої сторони трикутника DE визначається напрямком вектора струму замикання \dot{I}_3 , з яким співпадає вектор падіння напруги на опорі R_3 від струму замикання \dot{I}_3 . Ця сторона отримана внаслідок проведення прямої лінії через точку E паралельно вектору \dot{I}_3 . Координати точки a_4 перетину другої і третьої сторони трикутника – це координати кінця вектора падіння напруги $\Delta \dot{U}_L$.

Для проведення через точку E лінії паралельно напрямку вектора \dot{I}_3 створюється паралелограм Ea_1Oa_2 (лінія DE продовжується до перетину з віссю дійсних значень у точці a_2 , лінія вектора \dot{I}_3 продовжується до перетину в точці a_1 з прямою лінією, що проведена паралельно осі дійсних значень і проходить через кінець вектора \dot{U}_{A0} точку E). Сторона Ea_1 розташована паралельно осі дійсних значень, тобто паралельно стороні паралелограма Oa_2 . Уявна координата точки a_1 дорівнює уявній координаті кінця вектора напруги \dot{U}_{A0} , тобто

$$y_1 = \operatorname{Im}(\dot{U}_{A0}). \quad (1)$$

Дійсна координата точки a_1 визначається з прямокутного трикутника a_1Oa_3 з урахуванням того, що кут вектора струму \dot{I}_3 відомий

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{y_1}{x_1} = \frac{\operatorname{Im}(\dot{I}_3)}{\operatorname{Re}(\dot{I}_3)}. \quad (2)$$

Підставивши (1) в (2), отримаємо

$$x_1 = \frac{\operatorname{Im}(\dot{U}_{A0}) \cdot \operatorname{Re}(\dot{I}_3)}{\operatorname{Im}(\dot{I}_3)}. \quad (3)$$

Виходячи з рівності сторін паралелограму Oa_2 та Ea_1 , знаходимо дійсну координату точки a_2

$$x_2 = \operatorname{Re}(\dot{U}_{A0}) - x_1. \quad (4)$$

Щоб записати рівняння лінії Ea_2 , необхідно визначити уявну координату точки перетину a_3 . Кут між лінією Ea_2 та віссю Re дорівнює куту вектора струму замикання \dot{I}_3 , а тому

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = y_3 / x_2. \quad (5)$$

Виходячи з (5), уявна координата точки a_3

$$y_3 = \operatorname{tg} \varphi_3 \cdot x_2. \quad (6)$$

Розглянемо елементи векторної діаграми у декартовій системі координат. Рівняння прямої, що проходить через точку a_3 (падіння напруги на опорі в місці замикання від струму замикання у залежності від значення цього опору), у залежності від аргументу x

$$Y_1 = x \cdot \operatorname{tg} \varphi_3 + y_3. \quad (7)$$

Рівняння прямої лінії, що відповідає залежності вектора падіння напруги на опорі ділянки лінії від довжини цієї ділянки, отримуємо шляхом повороту вектора струму фази A на кут лінії $\varphi_{\text{ЛНН}}$

$$Y_2 = x \cdot \operatorname{tg}(\varphi_A + \varphi_{\text{ЛНН}}). \quad (8)$$

Оскільки метою є визначення координат точки перетину прямих $Y_1 = f(x)$ та $Y_2 = f(x)$, то запишемо, що у точці перетину значення цих функцій рівні між собою, тобто $Y_1 = Y_2$, або з урахуванням (7) та (8)

$$x \cdot \operatorname{tg} \varphi_3 + y_3 = x \cdot \operatorname{tg}(\varphi_A + \varphi_{\text{лнн}}). \quad (9)$$

Для значення аргументу $x = x_4$ з рівняння (9) отримаємо дійсну координату точки D перетину прямих, тобто отримаємо дійсну складову значення вектору падіння напруги $\Delta \dot{U}_L$

$$\operatorname{Re}(\Delta \dot{U}_L) = x_4 = \frac{y_3}{\operatorname{tg}(\varphi_A + \varphi_{\text{лнн}}) - \operatorname{tg} \varphi_3}.$$

Після визначення дійсної координати кінця вектору падіння напруги $\Delta \dot{U}_L$ з рівняння (7) у разі підстановки $x = x_4$ знаходиться уявна координата y_4 точки a_4 , тобто знаходиться уявна складова значення вектору падіння напруги $\Delta \dot{U}_L$.

Розглянутий алгоритм врахування кута α (у різних експериментах кут складає до 9-12 град.) забезпечує підвищення точності визначення місця замикання до 5,5%.

Додатково до заходу, розглянутого вище, на підвищення точності визначення місця замикання також впливає точність вимірювання струмів та напруг за допомогою вимірювальних трансформаторів. З метою оцінки технічної доцільності використання трансформаторів струму класу 0,2 замість класу 0,5 виконана на підставі експериментальних даних дев'яти дослідів замикань на лінії СЦБ у різних фазах на різній відстані (табл. 2). Відхилення значень струму у фазах трансформаторів струму класу 0,5 розраховані з урахуванням прийнятого припущення про те, що вимірювання струмів за допомогою ТС класу 0,2 дає точніші значення струмів. У табл. 2 наведені діючі значення струму фази, що замкнулась на землю, (повні значення) в амперах. З даних таблиці видно, що найбільше відхилення з трьох трансформаторів дає трансформатор струму у фазі A .

Таблиця 2

Фаза	Вимір	Відстань до точки замикання, в.о.		
		0,167	0,39	0,62
A	ТС 0,2	7,730	7,909	7,794
	ТС 0,5	7,681	7,859	7,748
	Відхилення значення струму, %	0,634	0,632	0,59
B	ТС 0,2	7,837	7,980	8,399
	ТС 0,5	7,843	7,981	8,410
	Відхилення значення струму, %	-0,077	-0,013	-0,131
C	ТС 0,2	7,577	7,763	7,509
	ТС 0,5	7,584	7,768	7,512
	Відхилення значення струму, %	-0,092	-0,064	-0,04

Проведені розрахунки на підставі даних табл. 2 показали, що відхилення значення струму у фазі A дає похибку у визначенні відстані замикання від 0,038 км до 0,132 км (0,1-0,3%). Таким чином підтверджена технічна доцільність використання ТС класу 0,2 (економічне обґрунтування не проводилось).

Співставлення результатів вимірювання напруг за допомогою три фазного трансформатора та дільників, що складені з активних опорів, проведено на підставі даних тих же експериментів.

Аналіз результатів табл. 2 не дав однозначної відповіді про доцільність використання одного чи другого варіанту вимірювання. Але розрахунки гармонійного складу напруг пошкоджених фаз вказують на перевагу використання трансформатора напруги типу НТМІ, оскільки дільники з активних опорів іноді дають занижені значення першої гармоніки (табл. 3, гармонійний склад напруги пошкоджених фаз, %).

Цілком зрозуміло, що значення ємностей, що включаються між фазами та землею, впливає на точність визначення відстані до точки замикання. Розрахунки режиму замикання й похибки визначення відстані до точки замикання проведені за допомогою математичної моделі реальної лінії СЦБ. У табл. 4 наведені результати розрахунків похибки визначення відстані замикання на землю (%) у залежності від значення ємності, включеної між фазами лінії СЦБ та землею. Аналіз отриманих результатів дозволяє визначити необхідне значення ємності, виходячи із допустимого значення похибки. При цьому необхідно також враховувати допустимість зростання напруг фаз лінії СЦБ, що виникає внаслідок збільшення ємностей.

Як вже було зазначено, включення ємностей між фазами та землею позитивно впливає на точність визначення відстані до місця замикання й разом з тим поліпшує якість електричної енергії за рахунок часткового вирівнювання фазних напруг. У зв'язку із цим були розглянуті й інші подібні заходи підвищення якості електричної енергії лінії СЦБ. Вибір потрібного заходу проведено на підставі розгляду варіантів з'єднання нейтралі силового трансформатора лінії СЦБ з землею (через активний, індуктивний або ємнісний опір) або з'єднання фаз лінії СЦБ із землею за допомогою

ємностей. При цьому оцінювались: коефіцієнти несиметрії напруг за зворотною та нульовою послідовністю, допустимість збільшення струмів фаз лінії в нормальному режимі та в режимі замикання на землю, а також вплив заходів на точність визначення відстані до місця замикання на землю.

Таблиця 3

Фаза	Тип перетворювача напруги	Номер гармоніки	Відстань до місця замикання, в.о.					
			0,167		0,39		0,62	
			До зам.	При зам.	До зам.	При зам.	До зам.	При зам.
А	Дільник з активних опорів	0*	1,0	49,9	0,7	14,3	0,6	9,6
		1	95,2	36,5	95,6	25,2	95,9	21,7
	НТМІ	0*	0,6	15,8	0,2	9,8	0,2	7,4
		1	95,7	77,7	96,0	56,3	96,1	8,2
В	Дільник з активних опорів	0*	1,0	8,2	0,7	6,0	0,4	3,5
		1	96,0	84,6	93,4	71,0	92,5	57,3
	НТМІ	0*	1,1	23,5	0,8	21,8	0,6	6,6
		1	95,9	69,0	93,5	50,2	92,8	40,7
С	Дільник з активних опорів	0*	0,4	1,5	0,3	0,9	0,1	1,4
		1	94,6	81,3	88,6	76,8	95,2	64,5
	НТМІ	0*	0,3	0,9	0,1	0,4	0,0	0,5
		1	94,5	81,6	89,1	80,0	95,3	58,1

*- постійний струм

Таблиця 4

Ємність, мкФ	Відстань до місця замикання, в.о.										
	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,99
0	50,0	4,7	2,23	1,42	1,02	0,8	0,66	0,58	0,53	0,51	0,51
1x0,64	-93,9	-8,7	-4,02	-2,56	-1,91	-1,62	-1,5	-1,52	-1,61	-1,77	-1,96
2x0,64	-22,8	-2,05	-0,93	-0,6	-0,47	-0,43	-0,44	-0,48	-0,56	-0,65	-0,75
3x0,64	-12,8	-1,11	-0,49	-0,32	-0,26	-0,26	-0,28	-0,33	-0,4	-0,48	-0,57
4x0,64	-8,74	-0,74	-0,32	-0,21	-0,18	-0,19	-0,22	-0,27	-0,34	-0,42	-0,5
5x0,64	-6,58	-0,54	-0,23	-0,15	-0,13	-0,15	-0,19	-0,24	-0,31	-0,38	-0,46

Висновки.

1. Запропоноване вдосконалення методу визначення місця замикання шляхом уточнення перетворення векторів завдяки підвищенню точності розрахунку вектора падіння напруги на ділянці пошкодженої лінії дає підвищення точності визначення місця замикання до 5,5 %.

2. Використання вимірювальних трансформаторів струму більш високого класу точності (0,2 замість 0,5) для вимірювання струмів не дає суттєвого підвищення точності визначення місця замикання, але може вважатись доцільним.

3. На підставі математичного моделювання встановлено, що підключення до фаз лінії СЦБ трьох ємностей 0,64 мкФ замість двох приводить до підвищення точності визначення місця пошкодження в діапазоні 0,2-1%. Також у цьому випадку є позитивним результатом вирівнювання фазних напруг, які стають майже однаковими. Але при такій ємності виникає зростання напруг до неприпустимого значення, а тому рекомендується включення не більше двох ємностей 0,64 мкФ на фазу.

Роботу виконано за бюджетною темою: «Розроблення моделей об'єднаної енергосистеми України та визначення заходів з її інтеграції до континентальної енергосистеми європейських країн – ENTSO-E» (шифр – «Монітор-3»). Державний реєстраційний номер роботи 0119U001211.

1. Izykowski J. Fault location on power transmission lines. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej. Wroclaw. 2008. 221 p.

2. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. Springer-Verlag, London Limited. 2010. 424 p.

3. Миронов О.С., Дяченко М.Д., Бурлака В.В., Бублик С.К. Спосіб визначення відстані до місця однофазного замикання на землю або дефекту ізоляції в електричних мережах з ізолюваною та компенсованою нейтраллю. Патент України, № 94145, 2009. МПК G01R31/08 (2011.01).
4. Swagata Das, Surya Santoso, Anish Gaikwad, Mahendra Patel. Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application. *IEEE Access*, Vol. 2. 2014. Pp. 537-557.
5. Стогній Б.С., Гребченко М.В., Максимчук В.Ф. Моніторинг стану ліній 10(6) кВ сигналізації, централізації та блокування електрифікованих залізниць. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 1. С. 40-46.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.040>
6. Сопель М.Ф., Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Визначення місця однофазного замикання на землю в умовах електромагнітного впливу на повітряних лініях сигналізації, централізації та блокування залізниць. *Техн. електродинаміка*. 2019. № 1. С. 50 - 54.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.050>
7. Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Визначення відстані до місць однофазних замикань на повітряних лініях. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 4. С. 83-85.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.083>
8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, 1997. 31 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЛИНИЯХ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И АВТОБЛОКИРОВКИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Б.С. Стогній¹, акад. НАН України, Н.В. Гребченко², докт.техн.наук, В.Ф. Максимчук³, Ю.В. Пилипенко¹, канд.техн.наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: regina@regina.org.ua

² Національний університет біоресурсів і природопольовання України,
ул. Героев Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

³ Укрзалізниця,
ул. Тверская, 5, Київ-150, 03680, Україна.

Развит метод определения места замыкания на землю на воздушных линиях сигнализации, централизации и автоблокировки железных дорог, предложенного авторами и основанного на дистанционном принципе. Показано, что нестационарное изменение параметров режима линии существенно затрудняет использование метода, из-за чего его точность не всегда удовлетворяет требованиям. Обобщен полученный опыт объединения в методе одновременно трех алгоритмов для определения места замыкания соответственно для каждой фазы линии. С целью повышения точности метода предложено усовершенствовать его за счет введения дополнительной операции уточнения значения вектора падения напряжения на сопротивлении фазы до места повреждения. Авторами ранее доказано, что в качестве входных параметров метода необходимо использовать значения корректируемых первых гармоник токов и напряжений, определяемых на основании измеренных с помощью трансформаторов тока и напряжения. Проведены эксперименты, позволившие оценить повышение точности измерения токов за счет использования трансформаторов тока более высокого класса точности и измерения напряжения с помощью делителей из активных сопротивлений. Проведены расчеты значения емкостей, включаемых между каждой фазой линии и землей для уменьшения электромагнитного воздействия на линию, которое возникает за счет близкого расположения линии два провода-рельс и контактной сети. Бібл. 8, табл. 4, рис. 2.

Ключевые слова: место замыкания, экспериментальные исследования, математическое моделирование, совершенствование метода, точность определения.

IMPROVEMENT OF 1PHASE FAULT LOCATION METHOD AT RAIL TRANSPORT SYSTEMS' SIGNALLING CONTROL LINES

B.S. Stognii¹, N.V.Grebchenko², V.F. Maximchuk³, Y.V.Pylypenko⁴,

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremogy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: regina@regina.org.ua

² National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv 03041, Ukraine

³ Ukrzaliznytsia,
Tverska str., 5, MSP Kyiv-150, 03680, Ukraine.

Fault location method at rail transport systems' signaling overhead control lines has been described. Complications of this method's usage due to dynamic changes of line's mode parameters which lead to inaccuracies have been indicated. Experience of combining in one method 3 algorithms for different phases of a line has been presented. To increase this method's accuracy it has been suggested to determine 1ph voltage vector between power source and location of the fault. It has been proved to use rated sinusoidal fundamental signals as input parameters for this method. Experiments have been carried out to supplement this method. Research to determine capacity values between each phase and earth has been carried out to lessen electromagnetic interference from contact system. References 8, tables 4, figures 2.

Key words: fault location, experimental study, mathematical modelling, refinement of method, accuracy.

1. Izykowski J. Fault location on power transmission lines. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej. Wroclaw. 2008. 221 p.
2. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. Springer-Verlag. London Limited. 2010. 424 p.
3. Mironov O.S., Djachenko M.D., Burlaka V.V., Bublik S.K. The method of determining the distance to a single-phase ground fault or defect in the insulation of electrical networks with isolated and compensated neutral. Patent of Ukraine, No 94145, G 01 R 31/08. 2009. (Ukr)
4. Swagata Das, Surya Santoso, Anish Gaikwad, Mahendra Patel. Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application. *IEEE Access*, Vol. 2. 2014. Pp. 537-557.
5. Stognii B.S., Grebchenko M.V., Maksimchuk V.F. Monitoring system for state of 10(6) kV signalization and blocking lines on railway. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 40-46 (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.040>
6. Sopol M.F., Grebchenko M.V., Maximchuk V.F., Pylypenko Y.V. Determination of seat of a single-phase circuit to earth under conditions of electromagnetic influence on the air line of signaling, centralization and blocking of railways. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 50-54 (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.050>
7. Grebchenko M.V., Maximchuk V.F., Pylypenko Y.V. Determination of the Distance to the Single-Phase Circuits on Overhead Lines. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 83-85 (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.0483>
8. State Standard 13109-97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moskva, 31 p. (Rus)

Надійшла 23.10.2019
Остаточний варіант 19.12.2019