

УДК 621.31

МОНІТОРИНГ СТАНУ ЛІНІЙ 10(6) кВ СИГНАЛІЗАЦІЇ, ЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ТА БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Б.С. Стогній¹, акад. НАН України, М.В. Гребченко², докт.техн.наук, В.Ф. Максимчук³

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, 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.

Запропоновано впровадження моніторингу для оцінки стану ліній сигналізації, централізації та блокування електрифікованих залізниць. Розроблено математичну модель електричної мережі електропостачання для проведення досліджень з визначення місця виникнення однофазних замикань на землю на підставі автоматичного аналізу вектора струму нульової послідовності. Запропоновано використання штучної електричної мережі, яка створює необхідні параметри контуру нульової послідовності та вирівнює напруги фаз лінії по відношенню до землі. Бібл. 6, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електропостачання залізниць, математична модель, ізольована нейтраль, замикання фази на землю, визначення місця пошкодження.

Вступ. Надійна робота автоматики електрифікованих залізниць залежить від надійності електропостачання в цілому тягових підстанцій [1] і, у значній мірі, від електропостачання, що забезпечують лінії 6–10 кВ сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) [2]. На цих лініях найчастіше серед усіх пошкоджень виникають замикання однієї фази на землю. Завдяки тому, що у мережі ліній СЦБ нейтраль не з'єднана з землею, у разі замикання лінія не потребує миттєвого відключення. Такий режим супроводжується підвищенням напруги непошкоджених фаз по відношенню до землі. Це може призвести до виходу із ладу трансформаторів напруги або виникненню міжфазних коротких замикань. Для скорочення часу усунення дефекту необхідно якомога швидше знайти місце виникнення замикання та визначення пошкодження. Розв'язанню цього питання присвячено багато публікацій, зокрема [1]–[5]. Для мереж із заземленою нейтраллю відомі методи визначення місця виникнення локального дефекту, більшість з яких оснований на розрахунку опору лінії до місця дефекту на підставі параметрів аварійного режиму.

У мережі з ізольованою нейтраллю (до якої належить лінія СЦБ 6–10 кВ) режим замикання на землю супроводжується відносно незначною зміною значень фазних струмів, що суттєво ускладнює визначення місця локального дефекту ізоляції. Але в кабельних мережах проблема пошуку місця замикання вирішується [3]. Це пов'язано з тим, що ємність кабельних ліній значно більше ємності повітряних ліній того самого класу напруги. Для ліній СЦБ проблема пошуку місця пошкодження посилюється не тільки тим, що це повітряна лінія, а ще й тим, що величину струму замикання забезпечує незначна ємність по відношенню до землі лінії СЦБ, яка є тільки одним навантаженням живильного трансформатора. Оскільки замикання на землю супроводжуються появою струмів і напруг нульової послідовності, то саме ці параметри можуть бути використані для побудови засобів визначення місця замикання.

Повітряна лінія СЦБ є одним навантаженням, яке отримує живлення від підвищувального трансформатора 0,4 кВ/6–10 кВ. Тому за відсутності розгалуженої мережі у разі виникнення замикання на землю сума струмів, що проходять на початку лінії, дорівнює нулю. На початку лінії струм нульової послідовності також дорівнює нулю.

Другою особливістю єдиної лінії СЦБ є те, що її навантаження розподілене вдовж всієї лінії і складається з декількох трифазних та декількох десятків однофазних трансформаторів, що підклю-

чені на різні між-фазні напруги. Точне врахування такого навантаження у простій математичній моделі утруднене.

Ще однією особливістю ліній СЦБ є те, що часто у нормальному режимі напруги фаз відносно землі значно відрізняються від номінального значення – авторами були отримані експериментальні дані. На рис. 1 показано векторні діаграми напруг фаз, отримані на двох лініях СЦБ. На рис. 1, а на діаграмі видно результат впливу на лінію СЦБ1 напруги фідера контактної мережі (ФКМ) фази А та лінії «два проводи-рейка» (ДПР). На рис. 1, б представлена діаграма напруг лінії СЦБ2, що відображає вплив напруги ФКМ фази В та лінії ДПР.

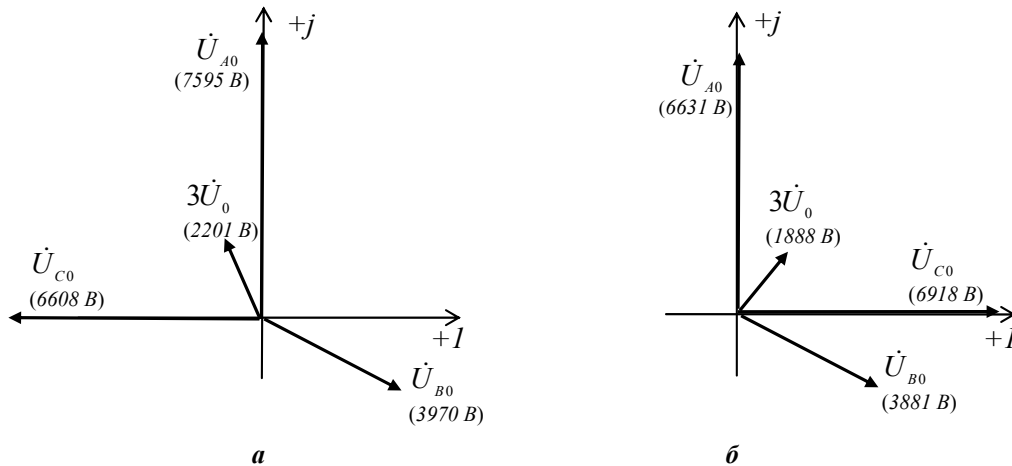


Рис. 1

Діаграми характеризуються тим, що, незважаючи на відсутність замикання на землю, фазні напруги відносно землі значно відрізняються від номінального значення – 6069 В (при лінійній напрузі 10500 В), а також присутня напруга нульової послідовності. Це явище пояснюється тим, що під дією напруги фідерів контактної мережі напруги повітряної лінії ДПР, яка розташовується на опорах фідерів контактної мережі, на всіх трьох фазах ліній СЦБ наводиться напруга. Під дією цієї наведеної напруги протікає струм через провідності фаз ліній СЦБ. Транспозиція дротів ліній СЦБ не може усунути наведення напруги. Вона забезпечує тільки близькі значення параметрів трьох фаз. У зв'язку з тим, що відстань між лінією СЦБ та лінією ДПР і ФКМ значно більше відстані між фазами СЦБ і на лінії застосована транспозиція, значення наведених напруг у кожній фазі СЦБ можна прийняти однаковими.

На сьогодні для визначення місця замикання на лінії СЦБ у [6] запропоновано короточасне з'єднання нейтралі живлячого трансформатора з землею. Одним із недоліків цього методу є низька точність при замиканні проводу лінії через перехідний опір. Крім того, у такому режимі є небезпека виникнення дуги та пожежі.

Підставою для розробки методів пошуку дефектів ізоляції (в тому числі замикань на землю) може бути використання залежності вектора струму нульової послідовності від параметрів дефекту ізоляції, тобто від місця виникнення та значення перехідного опору між фазою та землею. У разі виникнення замикання положення (зсув фаз) цього вектора струму визначається по відношенню до вектора міжфазної напруги [4]. Завдяки цьому забезпечується визначення положення вектора в усіх режимах, у тому числі й при замиканнях через перехідний опір, коли не завжди вдається точно визначити вектор напруги нульової послідовності.

Для реалізації методу визначення місця замикання на підставі вимірювання вектора струму нульової послідовності необхідно створити умови для виникнення струмів нульової послідовності. Наприклад, у разі наявності зовнішньої мережі короточасно підключити її до СЦБ або створити штучну зовнішню мережу. Для цього авторами запропоновано використати три ємності, з'єднані за схемою «зірки», кожна з яких підключена до відповідної фази лінії СЦБ між фазними трансформаторами струму і виводами обмоток трансформатора, який забезпечує живлення. При такому підключенні струми трьох фазних трансформаторів струму будуть використовуватися для розрахунку струму нульової послідовності.

У разі з'єднання з землею нульової точки «зірки» трьох ємностей, що підключені до фаз на початку лінії, створюється можливість визначити місце замикання та значення опору у місці зами-

кання, а також регулювати значення струму замикання. Останнє дозволяє знизити ймовірність виникнення пожежі.

Як джерело струму нульової послідовності можна використовувати струм, який проходить у проводі з'єднання нульової точки первинної обмотки вимірювального трансформатора напруги з землею. Але через велике значення опору обмоток високої напруги (ВН) цього трансформатора величина струму буде незначною, що не дозволить забезпечити його вимірювання з необхідною точністю. Тому **метою роботи** є розробка методу моніторингу та визначення місця замикання на землю лінії СЦБ на підставі вимірювання вектора струму нульової послідовності.

Перевірка пропозиції моніторингу лінії СЦБ, виконана на її математичній моделі. При створенні математичної моделі СЦБ прийнято наступні припущення:

- лінія СЦБ має однакове виконання по всій довжині, тобто значення параметрів трьох фаз однакові;
- лінія може бути представлена зосередженими параметрами, оскільки довжина не перевищує 300 км;
- опір триобмоткового трансформатора не враховується, оскільки потужність живлячого трансформатора 0,4/6–10 кВ значно менша;
- розподілене навантаження лінії розглядається як частково зосереджене.

Оскільки замикання на землю на лінії СЦБ не потребує миттєвого відключення, то перехідний процес, яким супроводжується замикання, можна не розглядати. У зв'язку з цим прийнято моделювати сталі режими роботи лінії.

При моделюванні режимів коротких замикань, а також замикань на землю за шини незмінної напруги прийнято шини 10(6) кВ підключені до обмотки 10(6) кВ триобмоткового трансформатора. У цьому випадку до цих шин підключено джерело живлення лінії, яке складається з двох послідовно ввімкнутих трансформаторів: ТМ-100/10/0,4 (знижує напругу) та ТМ-100/0,4/10(6) (підвищує напругу) [2]. Початкова схема заміщення блоку – лінія СЦБ–трансформатор – складена з 9-ти П-подібних схем ділянок лінії, кожна з яких знаходиться між однофазними трансформаторами навантаження. Потім виконано еквівалентування з одного боку всіх ділянок, які знаходяться між джерелом живлення і місцем замикання, а з іншого боку еквівалентовано всі ділянки лінії, що знаходяться між точкою замикання і кінцем лінії. На рис. 2 показано перетворена схема заміщення блоку лінії СЦБ – трансформатор.

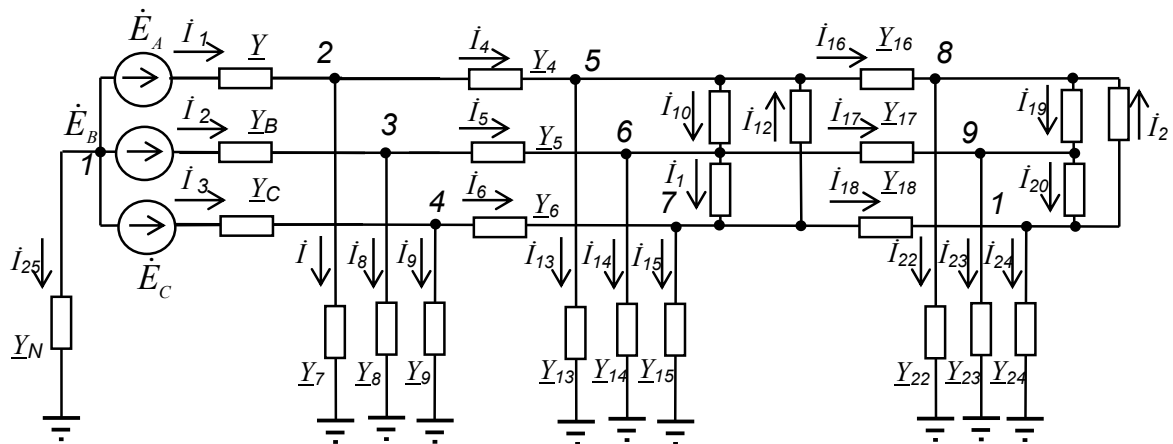


Рис. 2

На схемі використано наступні позначення: $E_A, E_B, E_C, Y_A, Y_B, Y_C$ – комплексні ЕРС та провідності джерела живлення; $Y_4, Y_5, Y_6, Y_{16}, Y_{17}, Y_{18}$ – комплексні поздовжні провідності лінії СЦБ; $Y_7, Y_8, Y_9, Y_{13}, Y_{14}, Y_{15}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}$ – комплексні поперечні провідності лінії; $Y_{10}, Y_{11}, Y_{12}, Y_{19}, Y_{20}, Y_{21}$ – комплексні провідності навантаження лінії СЦБ; Y_N – комплексна провідність заземлення нейтралі трансформатора.

Математичне моделювання режимів роботи блоку лінії СЦБ–трансформатор. Для розрахунку режимів обрано метод вузлових потенціалів у матричному вигляді. Рівняння для визначення потенціалів вузлів схеми

$$\varphi = \mathbf{g}(\mathbf{y})^{-1} \cdot \mathbf{J}(\mathbf{y}),$$

де $\|\mathbf{g}^{(y)}\|^{-1}$ – матриця, зворотна до матриці вузлових провідностей $\mathbf{g}^{(y)}$, яка складається з урахуванням схеми заміщення (рис. 2)

$$\mathbf{g}^{(y)} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{A}^T,$$

де \mathbf{A} – матриця з'єднань, $\mathbf{J}^{(y)}$ – матриця-стовпець вузлових струмів

$$\mathbf{J}^{(y)} = \begin{pmatrix} -\dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A - \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B - \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C \\ \dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A \\ \dot{E}_B \cdot \underline{Y}_B \\ \dot{E}_C \cdot \underline{Y}_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$E_a = \frac{10000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}; \quad E_b = \frac{10000 \cdot (-0,5 - j \cdot 0,866) \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}; \quad E_c = \frac{10000 \cdot (-0,5 + j \cdot 0,866) \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}.$$

Струми фаз визначаються

$$I_1 = y_A \cdot (\varphi_0 - \varphi_1 - E_A), \quad I_2 = y_B \cdot (\varphi_0 - \varphi_2 - E_B), \quad I_3 = y_C \cdot (\varphi_0 - \varphi_3 - E_C),$$

де $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – потенціали вузлів, що визначаються в результаті розрахунку.

Адекватність математичної моделі підтверджується співставленням результатів експериментів та розрахунків, отриманих авторами :

– у нормальному робочому режимі розрахункове діюче значення фазного струму лінії СЦБ не відрізняється від дійсного;

– при тому самому замиканні на землю, але з'єднаній нульовій точці живлячого трансформатора з землею, дійсне значення струму КЗ складає 51 А, розраховане на моделі – 55,42 А; 8,7% – відхилення.

Перевірка адекватності математичної моделі проведена шляхом співставлення розрахункових і дійсних значень струмів та напруг у режимах холостого ходу при замкненій на землю фазі С; робочого режиму при наявному навантаженні; робочого режиму при замкненій на землю фазі С; режимі однофазного КЗ фази С.

Модельовання впливу напруги лінії ДПР на лінію СЦБ.

Експериментально встановлено, що напруга фаз у робочому режимі лінії СЦБ завдяки впливу лінії ДПР досягає 7–8 кВ замість 5,78 кВ у симетричному режимі. Така напруга може спричинити загрозу електричному обладнанню, а у деяких випадках – загрозувати обслуговуючому персоналу (наприклад, при вимкненому вимикачі лінії значення напруги фази по відношенню до землі наближається до 2 кВ). Схема заміщення лінії СЦБ з урахуванням впливу лінії ДПР показана на рис. 3. Математичне моделювання впливу ФКМ та ДПР виконується шляхом врахування джерела необмеженої потужності (лінія СЦБ майже не є навантаженням для ФКМ та ДПР) та ємнісним зв'язком, який враховує близьке розташування двох ліній.

За допомогою математичної моделі СЦБ виконано дослідження режимів роботи лінії при різних способах реалізації з'єднання з землею нейтралі. Результати моделювання режимів роботи повітряної лінії СЦБ наведено в табл. 1 (перехідний опір у місці замикання 1 Ом).

Аналіз отриманих результатів показує, що заземлення нейтралі живлячого трансформатора для визначення місця замикання на землю можна замінити заземленням нейтралі зірки трьох конденсаторів 5 мкФ, що підключені до фаз лінії. Зменшення діапазону зміни амплітуди струмів може бути

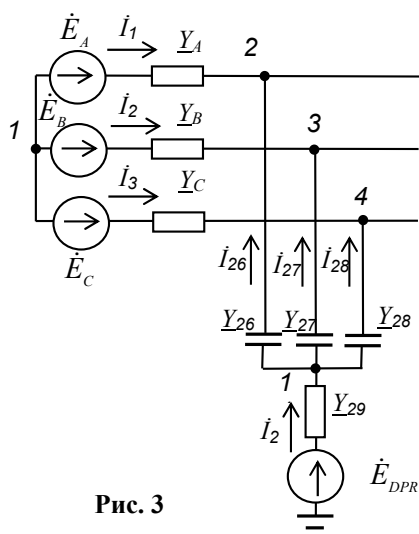


Рис. 3

компенсоване врахуванням додаткового фактора – фази вектора струму нульової послідовності. Так на рис. 4, а показані залежності струмів від відстані l_3 до місця замикання на землю (кінець лінії – 1 відносна одиниця): 1 – струм пошкодженої фази при заземленій нейтралі; 2 – струм пошкодженої фази при ізолюваній нейтралі з трьома ємностями по 5 мкФ; 3 – струм нульової послідовності при ізолюваній нейтралі з трьома ємностями по 5 мкФ.

Параметри режиму: діючі значення струмів фаз лінії СЦБ та їхні суми, аргумент вектора суми	Ізолювана нейтраль живлячого трансформатора		Заземлена нейтраль живлячого трансформатора ($Y_N=1$)		Заземлена нейтраль зірки трьох конденсаторів 5 мкФ	
	Робочий режим	Замикання фази на відстані 7,26 км	Замикання фази на відстані 7,26 км	Замикання фази на відстані 36,3 км	Замикання фази на відстані 7,26 км	Замикання фази на відстані 36,3 км
I_1 , А	2,284	3,081	55,418	45,837	47,671	44,292
I_2 , А	2,284	2,977	2,243	2,24	24,181	21,437
I_3 , А	2,284	1,918	1,815	1,805	27,325	26,535
I_4 , А	2,237	3,081	55,420	45,873	47,877	45,194
I_5 , А	2,237	2,883	2,203	2,055	3,453	2,679
I_6 , А	2,237	1,912	1,814	1,826	3,084	3,107
Модуль $I_4+I_5+I_6$, А	0	0,3	55,605	45,71	44,632	43,241
Аргумент $I_4+I_5+I_6$, рад.		-1,66	2,028	2,16	-2,018	-2,18

На рис. 4, б для режиму ізолюваної нейтралі з трьома ємностями по 5 мкФ використано спосіб представлення координат кінця вектора струму нульової послідовності на комплексній площині. Це дає найбільш повне уявлення про залежність вектора $3\dot{I}_0$ не тільки від відстані місця замикання

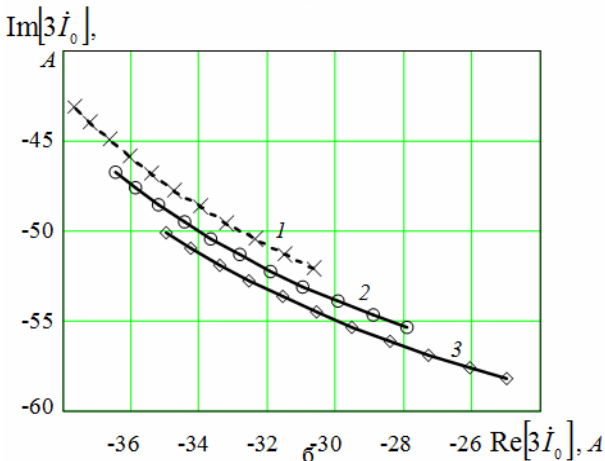
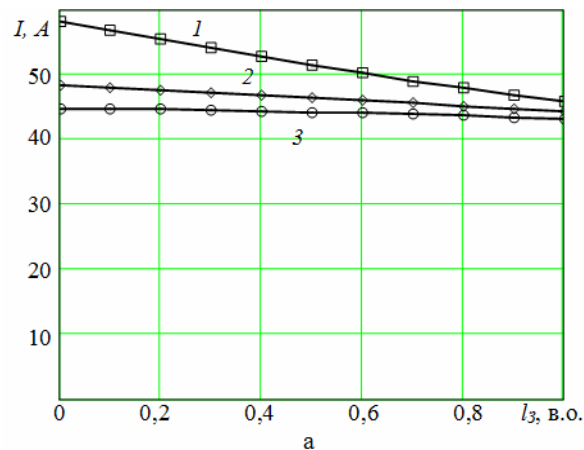


Рис.4

(точки розташовані одна від одної на відстані 10 % від довжини лінії), а й від значення перехідного опору в місці замикання.

Значення струму на дійсній та уявній осях вказані в амперах. Три криві починаються з різних точок координатної площини, тобто замикання в одній і тій самій точці (початок лінії) супроводжуються появою різних векторів струму нульової послідовності. Показані координати кінця вектора струму нульової послідовності на комплексній площині у разі зміни віддаленості точки замикання фази на землю від початку лінії до її кінця. Перехідний опір у місці замикання: крива 1 – 1 Ом, крива 2 – 10 Ом, крива 3 – 20 Ом.

Схема включення ємностей, що створюють штучну нейтраль. Альтернативним варіантом заземлення нейтралі у разі визначення місця замикання на землю є включення трьох ємностей, що з'єднані «зіркою», а їхня нульова точка з'єднана з землею. Схема живлення лінії СЦБ (роз'єднувач постійно ввімкнений) представлена на рис. 5. Для впровадження цієї схеми виконано перевірку можливості використання алгоритму визначення місця пошкодження, який розроблено Інститутом електродинаміки НАН України, та оцінка точності цього методу при використанні схеми рис. 5.

Висновки.

1. Запропоновано метод моніторингу та ви-значення місця замикання на землю лінії СЦБ на підставі вимірювання вектора струму нульової по-слідовності. Для реалізації методу до фаз лінії включаються три ємності, що з'єднані «зіркою», а їхня нульова точка з'єднана з землею.

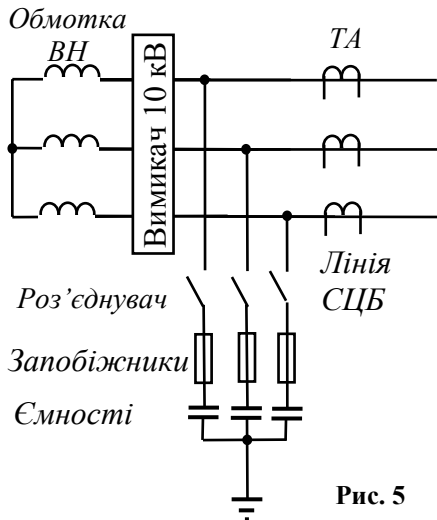


Рис. 5

2. Використання трьох конденсаторів, дозволяє:
– підвищити чутливість засобів визначення замикань на землю;
– визначити відстань до місця замикання існуючим методом розрахунку, але без короткочасного з'єднання нейтралі трансформатора з землею;
– забезпечити сталий режим роботи лінії СЦБ завдяки тому, що напруги усіх трьох фаз відносно землі будуть близькі до номінальної фазної напруги;
– знизити ймовірність ураження високою напругою обслуговуючого персоналу при роботі на відключеній лінії СЦБ.

3. При використанні батареї конденсаторів визначення місця замикання на землю може виконуватися методом, який заснований на залежності вектора струму нульової послідовності від параметрів замикання на землю, тобто від відстані до місця замикання і від величини перехідного опору в місці за-

микання. Реалізується метод або шляхом використання аналітичних виразів для розрахунку, або шляхом організації ітераційного процесу автоматичного пошуку місця замикання на підставі порівняння дійсного і розрахункового векторів струму нульової послідовності.

4. Розроблена математична модель блоку лінія СЦБ–трансформатор з урахуванням впливу лінії ДПР може бути використана для перевірки працездатності нових алгоритмів визначення місця замикання, а також для аналізу точності та правильності роботи системи моніторингу лінії СЦБ.

1. Доманський І.В. Перспективи розвитку схемно-технічних рішень зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №5 (979). – С. 54-65.

2. Герман Л.А., Векслер М.И., Шелом И.А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки. – Москва: Транспорт. – 1987. – 192 с.

3. Платонов В.В., Быкадыров В.Ф. Определение мест повреждения на трассе кабельной линии. – Москва: Энергоатомиздат. – 1993. – 256 с.

4. Стогний Б.С., Рогоза В.В., Сопель М.Ф., Голубов О.Ю. Определение места однофазного замыкания на землю // Техн. электродинамика. – 2007. – № 2. – С. 60-63.

5. Гребченко М.В., Бельчев І.В. Спосіб визначення відстані до місця виникнення локального дефекту ізоляції та опору цього дефекту у розподільчих мережах. Патент України №100180, 2012.

6. Стогний Б.С., Сопель М.Ф., Стасюк О.І., Тутик В.Л., Щербакова І.О., Железняк А.Л., Гончарова Л.Л., Подлесних Є.Г. Комп'ютерна система моніторингу і визначення місця аварії силових мереж СЦБ. Патент України №41967, 2009.

УДК 621.31

МОНІТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЛИНИЙ 10(6) кВ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Б.С. Стогний¹, академик НАН Украины, Н.В. Гребченко², докт.техн.наук, В.Ф. Максимчук³

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

e-mail: regina@regina.org.ua

² – Национальный университет биоресурсов и природопользования,

ул. Героев Оборона, 15, Киев, 03041, Украина,

³ – Укрзалізниця,

ул. Тверская, 5, Киев-150, 03680, Украина.

Рассмотрено внедрение мониторинга линий сигнализации, централизации и блокировки электрифицированных железных дорог. Система обеспечивает определение места возникновения однофазных замыканий на землю на основании автоматического анализа вектора тока нулевой последовательности. Предложено использование

искусственной электрической сети, которая создает необходимые параметры контура нулевой последовательности и выравнивает напряжения фаз линии по отношению к земле. Разработанная математическая модель электрической сети электроснабжения позволяет определять параметры системы мониторинга. Библ. 6, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: электроснабжение железных дорог, математическая модель, изолированная нейтраль, замыкание фазы на землю, определение места повреждения.

MONITORING SYSTEM FOR STATE OF 10(6) KV SIGNALIZATION AND BLOCKING LINES ON RAILWAY

B.S. Stognii¹, N.V. Grebchenko², V.F. Maksimchuk³

¹ – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

e-mail: regina@regina.org.ua

² – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
str. Heroiv Oborony, 15, Kyiv, 03041, Ukraine,

³ – Ukrzaliznytsia,
str. Tverskaia, 5, Kyiv-150, 03680, Ukraine.

Implementation of monitoring system for state of signalization and blocking lines on railway has been examined. System supports fault location for single-phase earth faults by automatic analysis of current's null string vector. Use of artificial electrical network has been proposed, which creates needed parameters of null string circuit and evens phase to ground voltages. Mathematical model of electrical network has been developed to determine parameters of monitoring system. References 6, figures 5, table 1.

Keywords: railway power supply, mathematical model, insulated neutral, earth fault, fault location.

1. Domanskii I.V. Progress prospect of circuit solutions for external power supply of traction substation // Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "Kharkivskiy Politekhnychnyi Instytut". – 2013. – No 5 (979). – Pp. 54-65. (Ukr)
2. German L.A., Veksler M.I., Shelom I.A. Equipment and lines of power supply for automatic lockout. – Moskva: Transport, 1987. – 192 p. (Rus)
3. Platonov V.V., Bykadyrov V.F. Fault location on cable run. – Moskva: Energoatomizdat. – 1993. – 256 p. (Rus)
4. Stognii B.S., Rogoza V.V., Sopel M.F., Golubov O.Yu. Fault location for single-phase earth fault // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2007. – No 2. – Pp. 60-63. (Rus)
5. Grebchenko M.V., Belchev I.V. Means to estimate distance to fault in isolation and its resistance in distribution lines. Patent Ukraine No 100180, 2012. (Ukr)
6. Stognii B.S., Sopel M.F., Stasiuk O.I., Tutyk V.L., Shcherbakova I.O., Zhelezniak A.L., Goncharova L.L., Podlesnykh E.G. The computer system of monitoring and the accident power networks SCB. Patent Ukraine No 41967, 2009. (Ukr)

Надійшла 16.09.2015
Остаточний варіант 22.10.2015