

ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ НА ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ, ЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ТА БЛОКУВАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

М.Ф. Сопель¹, докт.техн.наук, М.В. Гребченко^{2*}, докт.техн.наук, В.Ф. Максимчук³,
Ю.В. Пилипенко⁴, канд.техн.наук

¹-МПП «АНІГЕР», вул. Гарматна, 2, Київ, 03057, Україна,

²- Національний університет біоресурсів і природокористування,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна, e-mail: grebchenko@nubip.edu.ua

³- ПАТ Укрзалізниця, вул. Тверська, 5, Київ-150, 03680, Україна,

⁴- Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

Проведено аналіз чинників впливу на точність визначення відстані до місця однофазного замикання на землю на повітряній лінії (ПЛ) електричної системи з розподіленим навантаженням. Особливу увагу приділено несиметрії напруг, яка виникає внаслідок електромагнітного впливу високовольтної лінії. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена наявність оберненої залежності значення частки першої гармоніки в напрузі пошкодженої фази від відстані до місця замикання. Встановлено, що однією з основних причин існування цієї залежності є однофазні силові знижувальні трансформатори, що підключені до ПЛ за допомогою відгалужень, розташованих протягом усієї довжини лінії. На підставі використання цієї залежності запропоновано новий метод визначення відстані до місця замикання. Надано заходи щодо підвищення якості електричної енергії лінії. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: замикання на землю, відстань, вищі гармоніки, метод, точність, експеримент, моделювання.

Використання параметрів режиму роботи повітряної лінії (ПЛ) електричної системи для визначення відстані до місця однофазного замикання на землю є природним. Проте за такого підходу, звичайно, необхідно враховувати вплив різних чинників, що негативно впливають на точність визначення зазначеної відстані, насамперед тих, що призводять до суттєвої зміни параметрів режиму.

Відомі розробки методів визначення та дослідження режиму замикань на землю виконані для розгалужених мереж 6–35 кВ [1–4], але вони не передбачають можливості урахування електромагнітного впливу на параметри режиму ПЛ високовольтного обладнання. У відомих дослідженнях наявність декількох ліній, що підключаються до збірних шин, дає можливість визначення пошкодженої лінії на підставі порівняння значень струмів нульової послідовності таких ліній. При цьому несиметрія параметрів режиму лінії обумовлена внутрішніми факторами (несиметрія параметрів лінії або навантаження, несиметричні пошкодження та ін.), а не зовнішніми, такими як, наприклад, електромагнітний вплив високовольтних ліній.

Окрім зазначених чинників на повітряних лініях, що забезпечують живлення приладів сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) залізниць, є ще одна суттєва відмінність, що впливає на розробку методів визначення відстані до місця замикання на землю. Це наявність навантаження, живлення якого забезпечується від знижувальних силових трансформаторів, що підключені до лінії СЦБ за допомогою відгалужень [5].

Метою роботи є розробка методу визначення відстані до замикань на землю на повітряних лініях з розподіленим навантаженням при відсутності розгалуженої мережі й наявності електромагнітного впливу від високовольтної лінії.

Попередні експериментальні дослідження та математичне моделювання, проведені авторами, показали, що використання традиційних алгоритмів визначення відстані дає великі похибки через нелінійну залежність напруги на пошкодженій фазі від відстані до замикання. Нелінійність, в основному, обумовлена залежністю рівня вищих гармонік у параметрах режиму від відстані до замикання та електромагнітним впливом розташованої поряд високовольтної лінії. Високий рівень гармонік впливає на роботу систем автоматики [6]. Лінії СЦБ, як правило, розташовані на відстані 10–20 метрів вздовж ліній «два проводи–рейка» (ДПР), на яких є змінна напруга до 27,5 кВ, що впливає на лінії СЦБ. Авторами встановлено, що на фазах лінії СЦБ наводиться напруга до 2–2,5 кВ [7], через що виникає несиметрія напруг фаз по відношенню до землі (рис. 1, теоретичні векторні діаграми без врахування зміни напруги фази, створеної джерелом живлення). При цьому трикутник лінійних напруг у разі замикання на землю через великий опір (наприклад,

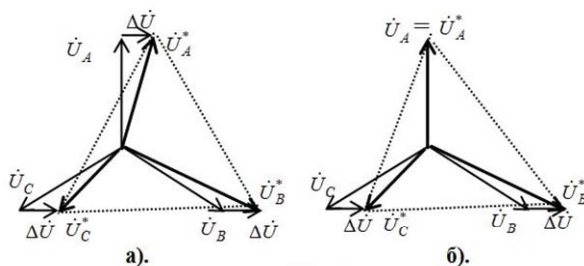


Рис. 1

замикання фази A , рис. 1, a) не змінюється, а у разі «металевого» замикання на землю (рис. 1, b) суттєво спотворюється. Таким чином, завдяки електромагнітному впливу на лінію СЦБ амплітуди векторів напруг фаз у робочих режимах ($\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$) значно відрізняються одна від одної та від номінального значення, а у разі замикання на землю ще додатково змінюються ($\dot{U}_A^*, \dot{U}_B^*, \dot{U}_C^*$). У залежності від відстані до місця замикання фази на землю значення вектора індукованої напруги $\Delta\dot{U}$ на пошкодженій фазі нелінійно змінюється, оскільки одночасно залежить від опору у місці замикання та від відстані до місця замикання.

Проведені авторами експериментальні дослідження показали, що силовий трансформатор та наявність розподіленого навантаження, для живлення якого використовуються однофазні та трифазні трансформатори, призводять до суттєвого спотворення струмів та напруг лінії СЦБ через те, що вони генерують вищі гармоніки [8]. Встановлено, що причиною виникнення вищих гармонік є нелінійність однофазних трансформаторів (ОТ) та наявність у їхньому складі навантаження випрямлячів.

На підставі об'єднання схем заміщення складових частин лінії СЦБ, наведених у [7], створено схему заміщення лінії СЦБ з трансформатором живлення з урахуванням впливу лінії ДПП (рис. 2) та прийнятого припущення про підключення на однаковій відстані вздовж лінії більше ніж 30 ОТ. Припустимо, що усі ОТ рівномірно розподілено (приєднано) вздовж ПЛ. У такому випадку значення частки першої гармоніки в напрузі пошкодженої фази також лінійно залежатиме від відстані до місця замикання на землю. На підставі схеми заміщення (рис. 2) розроблена математична модель лінії СЦБ.

Моделювання замикань на землю у різних місцях лінії СЦБ виконується за рахунок пропорційної зміни провідностей П-подібних схем заміщення двох частин (лівої та правої) лінії з двох сторін по відношенню до точки замикання у залежності від відстані у відносних одиницях до місця замикання b (рис. 2). При цьому одночасно також пропорційно відстані змінюються провідності навантаження ($\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \underline{Y}_3$ – еквівалентні провідності навантаження лінії між фазами до місця замикання; $\underline{Y}_4, \underline{Y}_5, \underline{Y}_6$ – те саме за місцем замикання) з двох сторін по відношенню до точки замикання

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \frac{b}{\sum_{i=1}^N (R_{Hi} + jX_{Hi})}, \quad \underline{Y}_4 = \underline{Y}_5 = \underline{Y}_6 = \frac{1-b}{\sum_{i=1}^N (R_{Hi} + jX_{Hi})}, \quad (1)$$

де R_{Hi} та X_{Hi} – опори i -го навантаження при загальній кількості N .

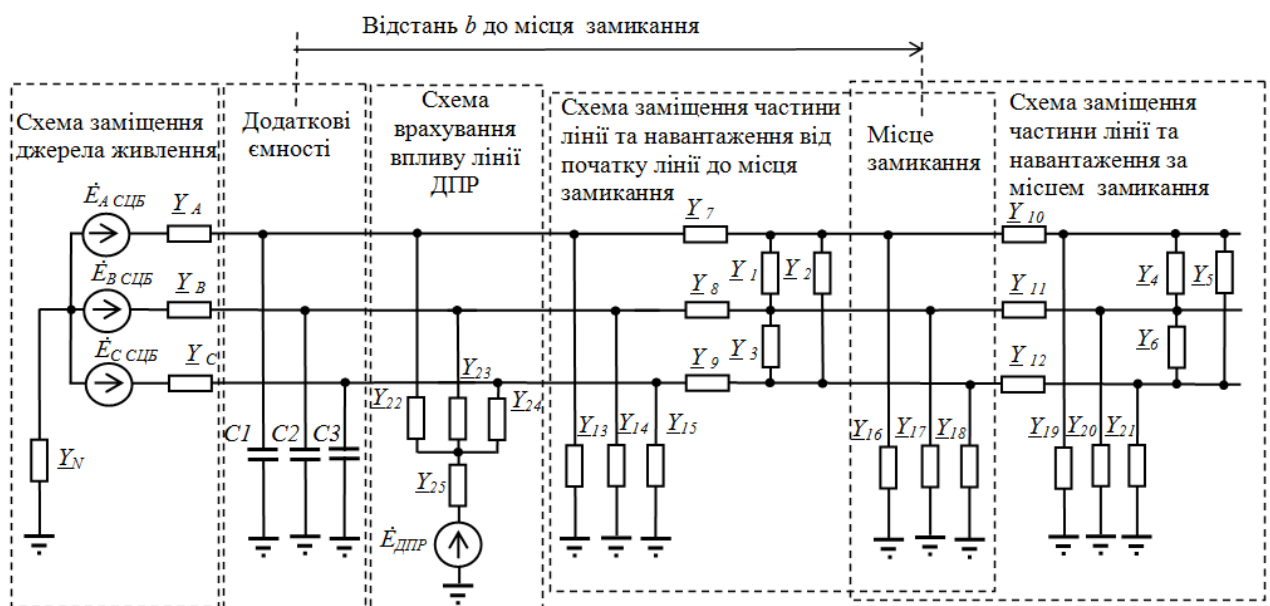


Рис. 2

На схемі (рис. 2) використано наступні позначення: $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – комплексні електрорушійні сили та провідності фаз джерела живлення лінії СЦБ; $\underline{Y}_7, \underline{Y}_8, \underline{Y}_9$ та $\underline{Y}_{10}, \underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{12}$ – комплексні поздовжні провідності фаз П-подібних схем заміщення відповідно до лівої та правої частин лінії СЦБ; $\underline{Y}_{13}, \underline{Y}_{14}, \underline{Y}_{15}$ та $\underline{Y}_{19}, \underline{Y}_{20}, \underline{Y}_{21}$ – комплексні поперечні провідності фаз П-подібних схем заміщення відповідно лівої та правої частин лінії СЦБ; $\underline{Y}_{16}, \underline{Y}_{17}, \underline{Y}_{18}$ – сумарні комплексні поперечні провідності фаз П-подібних схем заміщення лівої та правої частин лінії СЦБ; \underline{Y}_N – комплексна провідність заземлення нейтралі трансформатора, $C1, C2, C3$ – емності, що забезпечують з'єднання фаз на початку лінії з землею.

З метою визначення характеру залежності розподіленого навантаження від відстані до місця замикання для однієї з ліній СЦБ виконані розрахунки навантаження. Для цього на окремих ділянках лінії, у яких відомі точні координати початку та кінця, підсумовано номінальні значення повної потужності трансформаторів S (S –

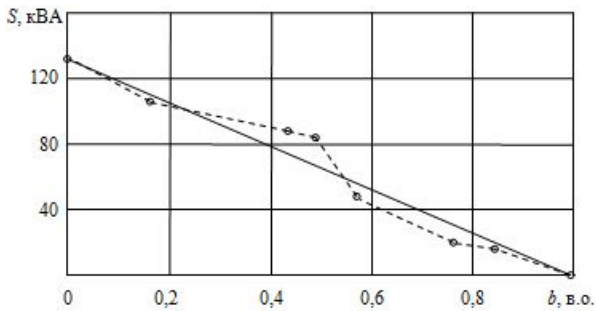


Рис. 3

кання проведені для кожної фази у трьох місцях, що розташовані на відстанях: 0,167, 0,39 та 0,62 в.о. Залежності значення частки першої гармоніки від відстані відрізняються для різних фаз, що обумовлено різним розподілом місць підключення ОТ вздовж кожної фази лінії.

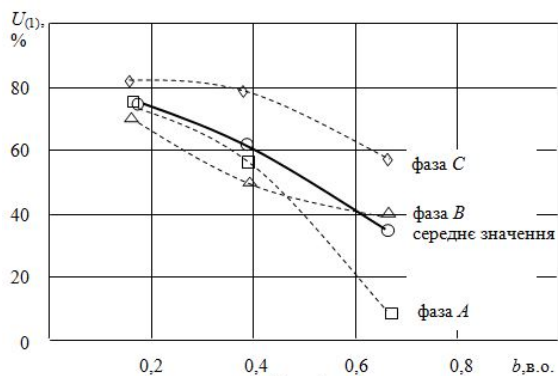


Рис. 4

Одним із параметрів, що залежить від відстані до замикання, є значення напруги пошкодженої фази по відношенню до землі. За результатами досліджень на рис. 5 показано вимірні значення напруги пошкодженої фази в залежності від фази лінії та відстані до місця замикання. З нього видно, що вимірні значення напруг, окрім фази B, змінюються нелінійно і навіть всупереч очікуванням у фазі A напруга зменшується замість збільшення. Зрозуміло, такі значення не дають змоги правильно визначити відстань до місця замикання. Однією з головних причин такого положення є вищі гармоніки в напругах і струмах, амплітуди яких змінюються у залежності від відстані до місця замикання.

Безпосереднє використання повних значень параметрів режиму, а у багатьох випадках й використання перших гармонік струмів та напруг, дає неприпустимі значення похибок розрахунку відстані до місця замикання.

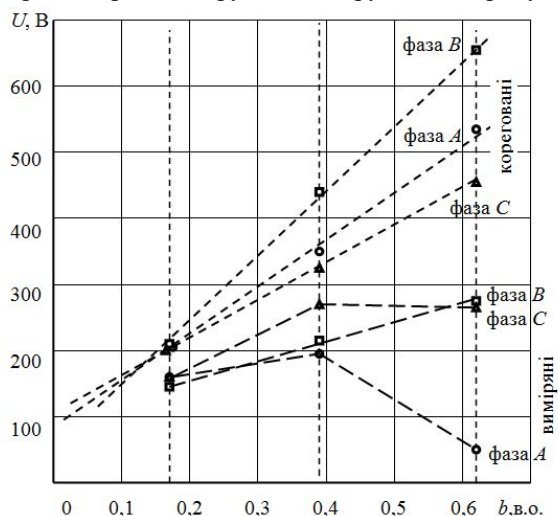


Рис. 5

сума потужностей ОТ відносно початку ПЛ). Результати визначення розподілу сумарної потужності трансформаторів у залежності від розташування вздовж відстані лінії b представлені на рис. 3. Як видно з рисунка, отримана залежність наближається до лінійної, тобто підтверджується обґрунтованість використання у моделі формул (1).

Експериментально встановлено, що у разі замикання на землю гармонійний склад параметрів режиму лінії у кожній фазі змінюється, але найбільше змінюється значення частки першої гармоніки в напрузі пошкодженої фази (рис. 4). На рис. 4 показано результати експериментальних досліджень на лінії СЦБ, що знаходиться в робочому режимі: значення частки першої гармоніки $U_{(1)}$ у напрузі пошкодженої фази для дев'яти дослідів. Замикання

На підставі аналізу встановлено, що характер залежності середнього значення частки першої гармоніки в напрузі $U_{(1)}$ (% від повного значення напруги) від відстані до місця замикання (рис. 4) наближається до характеру залежності середнього значення навантаження (рис. 3). При цьому значення частки першої гармоніки в напрузі пошкодженої фази обернено й майже лінійно залежить від відстані до місця замикання. Такий характер залежності обумовлений збільшенням кількості джерел вищих гармонік, що включено паралельно між собою на ділянці лінії до місця замикання, у разі зростання відстані до місця замикання. Кількість цих джерел визначається кількістю підключених до лінії ОТ на ділянці до точки замикання з урахуванням того, що у кожній фазі реальна кількість ОТ відрізняється від тієї, яку дає припущення про рівномірне розташування ОТ вздовж всієї ПЛ.

Виходячи з того, що амплітуда першої гармоніки $A_{(1)}$ та значення частки першої гармоніки k_1 у повному значенні параметра A (струм, напруга) відомі, запропоновано визначати амплітуду повного сигналу за наступним співвідношенням:

$$A = A_{(1)} / k_1.$$

Фаза сигналу A приймається такою самою, як фаза першої гармоніки. Таким чином, виконується корекція параметрів режиму ПЛ. Результати корекції напруг пошкоджених фаз показано на рис. 5. Видно, що отримані залежності майже лінійні. Використання запропонованого способу корекції дало змогу суттєво підвищити точність визначення відстані до місця замикання з використанням алгоритму [9]. Наприклад, середнє абсолютне значення похибки зменшилося з 44,3 до 30,9%.

З метою подальшого підвищення точності визначення відстані до місця однофазного замикання в умовах електромагнітного впливу на ПЛ запропоновано метод, у

якому автоматично, в залежності від рівня вищих гармонік, вибирається алгоритм розрахунку опору пошкодженої фази лінії до місця замикання, на підставі якого визначається відстань до місця замикання: у першому алгоритмі використовуються безпосередньо виміряні значення параметрів режиму, у другому – кориговані перші гармоніки цих параметрів, у третьому – значення частки першої гармоніки в параметрах режиму ПЛ. Майже усі похибки за цим методом знаходилися у діапазоні від 0,6 до 12,7%.

З метою підвищення якості електричної енергії лінії СЦБ шляхом зниження несиметрії напруг фаз розглянуто варіанти з'єднання нейтралі силового трансформатора з землею за допомогою активного, індуктивного або ємнісного опору, а також запропоновано варіант з'єднання кожної фази ПЛ із землею з використанням ємностей C (рис. 2). Співставлення варіантів проведено на підставі результатів математичного моделювання з використанням схеми (рис. 2), за допомогою якої виконувалися розрахунки режиму замикання на землю у різних точках ПЛ. Адекватність математичної моделі підтверджена шляхом співставлення результатів розрахунків з її використанням і експериментальних даних. Як критерії оцінки варіантів підвищення якості електричної енергії вибрані: мінімум коефіцієнтів несиметрії за зворотною та нульовою послідовністю напруг; відсутність необхідності заміни вимірювальних трансформаторів струму; найвища точність визначення відстані до замикання. За результатами математичного моделювання прийнято рішення про необхідність з'єднання кожної фази з землею з застосуванням ємностей $2 \times 0,64$ мкФ.

Висновки.

1. Запропоновано метод визначення відстані до місця однофазного замикання на землю в умовах електромагнітного впливу на ПЛ СЦБ залізниці, у якому значення відстані до місця замикання визначається за одним із трьох алгоритмів. Необхідний алгоритм обирається автоматично в залежності від рівня вищих гармонік у параметрах режиму ПЛ. В одному алгоритмі використовуються безпосередньо виміряні значення параметрів режиму ПЛ, у другому – значення частки перших гармонік у параметрах режиму ПЛ, у третьому – значення перших гармонік параметрів режиму ПЛ, що визначаються шляхом ділення амплітуд виміряних перших гармонік струмів та напруг на визначені значення частки першої гармоніки у відповідному параметрі режиму.

2. Встановлено, що значення частки першої гармоніки в напрузі пошкодженої фази обернено залежить від відстані до місця однофазного замикання. Залежність обумовлена майже рівномірним підключенням вздовж довжини лінії однофазних трансформаторів, що є джерелами вищих гармонік.

3. На підставі співставлення різних варіантів підвищення якості електричної енергії ПЛ СЦБ шляхом зниження несиметрії напруг фаз обґрунтовано доцільність використання схеми підключення кожної фази лінії до землі з застосуванням ємностей з однаковим значенням. Визначено оптимальне значення ємностей.

1. Баран П.М., Кідиба В.П., Равлик О.М. Визначення виду та місця пошкодження на лініях з відгалуженням. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2008. № 615. С. 8-13.
2. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1982. 312 с.
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 94145 Україна. Опубл. 10.02.2010. Бюл. № 3.
4. Фигурнов Е.П., Бодров П.А. Определение места однофазного замыкания на землю в высоковольтных линиях электроснабжения автоблокировки железных дорог. *Релейная защита и автоматика энергосистем 2004*. 2004. С. 88-93.
5. Герман Л.А., Векслер М.И., Шелом И.А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки. Москва: Транспорт, 1987. 192 с.
6. Hamed Jafari Kaleybar, Hossein Madadi Kojabadi, Morris Brenna, Federica Foidelli, Seyed Saeed Fazel. An active railway power quality compensator for 2×25 kV high-speed railway lines. 2017 IEEE International Conference on *Environment and Electrical Engineering* and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). 2017. Milan, Italy. Pp. 1-6.
7. Стогній Б.С., Гребченко М.В., Максимчук В.Ф. Моніторинг стану ліній 10(6) кВ сигналізації, централізації та блокування електрифікованих залізниць. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 40-46.
8. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
9. Гребченко М.В., Максимчук В.Ф., Пилипенко Ю.В. Визначення відстані до місць однофазних замикань на повітряних лініях. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 83-85.

УДК 621.316.925

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ НА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

М.Ф. Сопель¹, докт.техн.наук, Н.В. Гребченко², докт.техн.наук, В.Ф. Максимчук³, Ю.В. Пилипенко⁴, канд.техн.наук

¹ МЧП «АНИГЕР», ул. Гарматная, 2, Киев, 03057, Украина,

² Национальный университет биоресурсов и природоиспользования,

ул. Героев Оборонь, 15, Киев, 03041, Украина, e-mail: grebchenko@nubip.edu.ua

³ ПАТ Укрзалізниця, ул. Тверская, 5, Киев-150, 03680, Украина,

⁴ Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

Проведен анализ факторов влияния на точность определения расстояния до замыкания на землю на воздушной линии узла электрической системы с распределенной нагрузкой. Особое внимание уделено несимметрии напряжений, которая возникает вследствие электромагнитного влияния высоковольтной линии. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено наличие обратной зависимости значения доли первой гармоники в напряжении поврежденной фазы от расстояния до замыкания. Установлено, что одной из основных причин существования этой зависимости являются однофазные силовые трансформаторы, подключенные вдоль линии с целью обеспечения питания нагрузки. На основе использования этой зависимости предложен новый метод определения расстояния до места замыкания. Предоставлены меры по повышению качества электрической энергии линии. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: замыкание на землю, расстояние, высшие гармоники, метод, точность, эксперимент, моделирование.

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

M.F. Sopol¹, N.V. Grebchenko², V.F. Maximchuk³, Y.V. Pylypenko⁴

¹ PE "ANIGER", Harmatna str., 2, Kyiv, 03680, Ukraine,

² National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: grebchenko@nubip.edu.ua

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

⁴ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

The analysis of the influence factors on the accuracy of the location of the earth fault on an overhead line with a distributed load. The existence of an inverse dependence of the value of the first harmonic part in the voltage of the damaged phase from the distance to the closure is theoretically substantiated and experimentally confirmed. One of the main reasons for this is the distributed along the line load, which is connected to the line through single-phase transformers. Proposed measures to improve the quality of the electric energy of the line and the accuracy of the determination of the location of the closure. References 9, figures 5.

Key words: ground fault, higher harmonics, method, accuracy, experiment, modeling.

1. Baran P.M., Kydyba V.P., Ravlyk O.M. Determining the type and location of the damage on the lines with a branch. *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*. 2008. No 615. Pp. 8-13. (Ukr)

2. Shalit G.M. Determination of fault locations in electrical networks. Moskva: Energoatomizdat. 1982. 312 p. (Rus)

3. Mironov O.S., Djachenko M.D., Burlaka V.V., Bublik S.K. Method for determining the distance to a single-phase earth fault or isolation defect in isolated and compensated neutral electric networks. Patent Ukrainy No 94145. 2010. (Ukr)

4. Figurnov E.P., Bodrov P.A. Determination of the place of single-phase ground fault in the high voltage power lines of automatic block system of railways. *Protection and automation of power systems 2004*. 2004. Pp. 88-93. (Rus)

5. German L.A., Veksler M.I., Shelom I.A. Equipment and lines of power supply for automatic lockout. Moskva: Transport, 1987. 192 p. (Rus)

6. Hamed Jafari Kaleybar, Hossein Madadi Kojabadi, Morris Brenna, Federica Foadelli, Seyed Saeed Fazel. An active railway power quality compensator for 2×25 kV high-speed railway lines. 2017 IEEE International Conference on *Environment and Electrical Engineering* and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Milan, Italy. Pp. 1-6.

7. Stognii B.S., Grebchenko N.V., Maximchuk 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)

8. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strachov S.V. Fundamentals of the theory of chains. Moskva: Energoatomizdat, 1989. 528 p. (Rus)

9. Grebchenko N.V., Maximchuk V.F., Pilipenko J.V. Determination of the distance to the single-phase circuits on overhead lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 83-85. (Ukr)

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 10.08.2018