

В. М. Безручко¹
Р. О. Буйний¹
В. І. Ткач¹

ВІДБІР ПОТУЖНОСТІ ВІД СТРУМУ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ПРИБАДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗАМИКАННЯ

¹Чернігівський національний технологічний університет

Електричні мережі напругою 6–35 кВ в Україні працюють в режимі з ізольованою нейтраллю, що дозволяє їм зберігати працездатність у разі утворення однофазних замикань на землю. Однак наявність таких замикань збільшує ймовірність утворення міжфазних коротких замикань. Тому їх намагаються усунути якнайшвидше. Існуючі пристрої дозволяють лише звузити зону пошуку до виявленого відгалуження від магістралі повітряної лінії, а пошкодження повинно бути знайдене під час обходу персоналом траси лінії та візуального її контролю. Авторами запропонований інноваційний пристрій ідентифікації однофазних замикань на землю, який дозволяє визначити місце замикання з точністю до опори повітряної лінії за умови наявності такого пристрою на кожній опорі. Такий прилад після ідентифікації наявності однофазного замикання на землю на опорі відправляє повідомлення через GSM мережу стільникового зв'язку до диспетчерського пункту. Проведено аналіз можливих джерел живлення такого пристрою. Запропоновано жити пристрій безпосередньо від струму замикання. Відбір потужності від струму через металевий спуск заземлення опори пропонується виконувати за допомогою спеціального трансформатора, що забезпечить максимізацію відбору потужності та збереже цілісність контуру заземлення траверси опори. Запропонована математична модель, що дозволяє розрахувати параметри режиму роботи такого трансформатора за різних значень струму замикання та його габаритних характеристик. Встановлено, що запропонований підхід до побудови джерела живлення дозволяє відбирати достатньо енергії, яка може акумулюватися у ємнісному накопичувачі та використовуватися для живлення приладу під час надсилання повідомлення про місце пошкодження на повітряній лінії. Встановлено, що максимальний час накопичення енергії та, як наслідок, відправки повідомлення про пошкодження, може сягати 10 хвилин, за які персонал оперативно-виїзної бригади повинен підготуватися для виїзду до місця пошкодження.

Ключові слова: електричні мережі 6–35 кВ, електричні мережі з ізольованою нейтраллю, однофазні замикання на землю, пошук місця замикання, відбір потужності.

Вступ

Електричні мережі напругою 6-35 кВ в Україні та в більшості пострадянських країн працюють в режимі з ізольованою нейтраллю, що дозволяє їм зберігати працездатність у разі утворення однофазних замикань на землю (ОЗЗ). Однак наявність ОЗЗ на повітряній лінії (ПЛ) збільшує ймовірність утворення міжфазного замикання через збільшення напруг на ізоляції непошкоджених фаз внаслідок замикання. Тому час усунення замикання має вирішальне значення для збереження електропостачання споживачів.

Сьогодні оперативно-виїзні бригади (ОВБ), що здійснюють пошук та усунення пошкоджень, використовують «традиційні» пристрої пошуку ОЗЗ: «Поиск», «Спектр», «Зонд», «Волна», «Квант» і т. п., що визначають лише напрям, в якому слід рухатись ОВБ вздовж траси ПЛ для пошуку ОЗЗ. Для пришвидшення пошуку місця ОЗЗ використовуються:

– індикатор короткого замикання [1], фіксатор короткого замикання [2], [3] — такі пристрої встановлюються на кожному відгалуженні ПЛ та дозволяють фіксувати лише факт наявності ко-

роткого замикання на відгалуженні, а також ОЗЗ, у випадку його переведення у міжфазне замикання закорочуванням непошкодженої фази, що лише звужує зону пошуку до виявленого відгалуження та призводить до протікання великих струмів короткого замикання через електрообладнання електричних мереж. Ці пристрої живляться від акумулятора, який буде потребувати обслуговування;

– комплект ІКЗ-33У [4] — такий пристрій складається з трьох індикаторів короткого замикання, що розміщуються на проводах ПЛ. Вони живляться від акумуляторів та встановлюються на кожному відгалуженні ПЛ.

Усі з вищезазначених пристроїв дозволяють лише звузити зону пошуку до виявленого відгалуження від магістралі ПЛ, а пошкодження повинно бути знайдене традиційним способом пошуку під час обходу персоналом ОВБ лінії електропередавання та візуального контролю.

Авторами запропоновано інноваційний пристрій ідентифікації ОЗЗ, який дозволяє визначити місце ОЗЗ з точністю до опори ПЛ. Принцип його роботи описано у роботах [5], а інтеграція його в мережу в роботі [6].

Метою роботи є доведення можливості використання струму ОЗЗ для живлення пристрою, що мінімізує вартість та підвищить експлуатаційну надійність приладу.

Результати дослідження

Як джерело живлення для пристроїв аналізу параметрів повітряних ліній зазвичай використовують енергію, накопичену в акумуляторі, або енергію сонця, що відбирається з фотоелектричних панелей [1]—[4].

Акумуляторні джерела живлення мають низку недоліків, серед яких слід відмітити малий строк служби (близько 5 років) у порівнянні зі строком служби повітряної лінії електропередавання. Внаслідок цього акумулятори у пристроях будуть самі потребувати обслуговування та періодичної заміни.

Фотоелектричні панелі на сьогодні мають значну вартість та потребують акумулятор для живлення пристроїв у нічний період.



Рис. 1. Розміщення ідентифікатора ОЗЗ на ПЛ та його конструктивне виконання

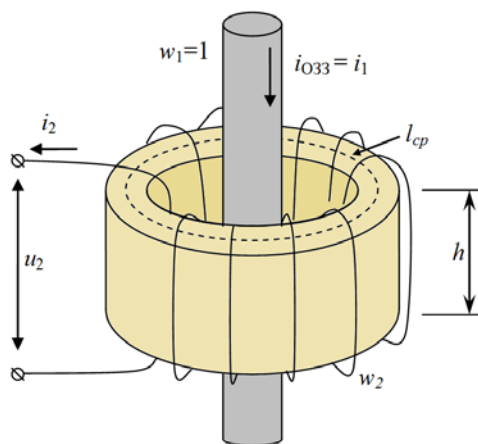


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції трансформатора для відбору потужності від струму ОЗЗ

З вищезазначеного випливають вимоги, яким має відповідати джерело живлення пристрою, що буде встановлюватися на кожному опорі ПЛ: простота конструкції, дешевизна, довговічність; відсутність необхідності в періодичному обслуговуванні.

Отже пристрій потребує інноваційного підходу для живлення. В якості джерела енергії пропонується використовувати струм ОЗЗ, що протікає крізь пошкоджений штировий ізолятор, траверсу, та металевий спуск опори повітряної лінії електропередавання (рис. 1).

Відбирати енергію струму можна за допомогою особливого трансформатора струму (рис. 2), який дозволить отримати напруги на своєму виході (вторинній обмотці) більшу, ніж напруга живлення електроніки (приблизно 2,7...5,0 В). Такий трансформатор встановлюється у металевий заземлюючий спуск опори ПЛ.

Ефективність такого блока живлення потребує доведення, для чого потрібна математична модель, що дасть уяву про зв'язок конструктивних параметрів трансформатора та струму замикання на землю I_{033} (струму у первинній обмотці i_1) з потужністю на виході P_2 .

Згідно з першим рівнянням Максвелла для тороїдального магнітопроводу з зовнішнім діаметром D , внутрішнім діаметром вікна d та товщиною h , напруженість магнітного поля можна розрахувати за формулою

$$H = (w_1 i_1 - w_2 i_2) / l_{cp}, \quad (1)$$

де l_{cp} — середня довжина магнітного шляху в магнітопроводі, м; i_1, i_2 — струм у первинній та вторинній обмотках, А; w_1, w_2 — кількість витків у первинній та вторинній обмотках.

Величина магнітної індукції B в зоні, далекій до насичення, наближено визначається

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (2)$$

де $\mu \neq \text{const}$ — відносна магнітна проникність матеріалу осердя; μ_0 — магнітна постійна, $4\pi 10^{-7}$ Гн/м.

За законом електромагнітної індукції Фарадея електрорушійна сила на вторинній обмотці e_2 може бути розрахована за формулою

$$e_2 = w_2 d\Phi / dt, \quad (3)$$

де Φ — магнітний потік, що проходить крізь вторинну обмотку

$$\Phi = B \cdot S, \quad (4)$$

де S — площа перерізу осердя магнітопроводу, м².

За умови синусоїдального струму у первинній обмотці з амплітудою I_m

$$i_1 = I_m \cdot \sin \omega t. \quad (5)$$

ЕРС на вторинній обмотці буде дорівнювати:

$$e_2 = w_2 \mu \mu_0 S \left(w_2 \frac{d}{dt} i_2(t) - w_1 I_m \omega \cdot \cos \omega t \right) / l_{cp}. \quad (6)$$

Згідно з II законом Кірхгофа при підключенні до вторинної обмотки навантаження

$$R \cdot i_2 = e_2. \quad (7)$$

Розв'язавши диференціальне рівняння, утворене з формул (6) та (7), отримаємо:

$$i_2(t) = C1 \cdot e^{-\frac{R \cdot l_{cp}}{w_2^2 \mu \mu_0 S} t} + \frac{I_m S \mu \mu_0 \omega w_1 w_2 \left(S \mu \mu_0 \omega w_2^2 \sin \omega t + R \cdot l_{cp} \cos \omega t \right)}{\left(w_2^2 \mu \mu_0 S \right)^2 + R^2 l_{cp}^2}, \quad (8)$$

де $C1$ — константа, що залежить від початкових умов.

Для усталеного режиму можна отримати, що

$$i_2(t) = I_m S \mu \mu_0 \omega w_1 w_2 \left(S \mu \mu_0 \omega w_2^2 \sin \omega t + R \cdot l_{cp} \cos \omega t \right) / \left(w_2^2 \mu \mu_0 S^2 + R^2 l_{cp}^2 \right), \quad (9)$$

а діюче значення струму у вторинному колі буде дорівнювати

$$I_{2rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_2(t)^2 dt} = I_m S \mu \mu_0 \omega w_1 w_2 / \sqrt{2 \left(w_2^2 \mu \mu_0 S \right)^2 + 2 R^2 l_{cp}^2}. \quad (10)$$

Потужність, що буде відбиратися навантаженням, можна розрахувати за формулою

$$P_2 = I_{2rms}^2 \cdot R_H = \left(I_m S \mu \mu_0 \omega w_1 w_2 \right)^2 \cdot R_H / \left(2 \left(w_2^2 \mu \mu_0 S \right)^2 + 2 R^2 l_{cp}^2 \right), \quad (11)$$

а напруга на виході буде дорівнювати

$$U_2 = I_m S \mu \mu_0 \omega w_1 w_2 R_H / \sqrt{2 \left(w_2^2 \mu \mu_0 S \right)^2 + 2 R^2 l_{cp}^2}. \quad (12)$$

Слід зазначити, що отримані формули справедливі лише для ненасиченого стану матеріалу осер-

дя. Тому за значних струмів первинної обмотки вихідна напруга буде мати менше діюче значення. Індукція, що створюється в осерді за різного струму первинної та вторинної обмотки

$$B(t) = \mu\mu_0 I_m w_1 R \frac{S \mu\mu_0 \omega w_2^2 \cos \omega t + R \cdot l_{cp} \sin \omega t}{(w_2^2 \mu\mu_0 S)^2 + R^2 l_{cp}^2} \quad (13)$$

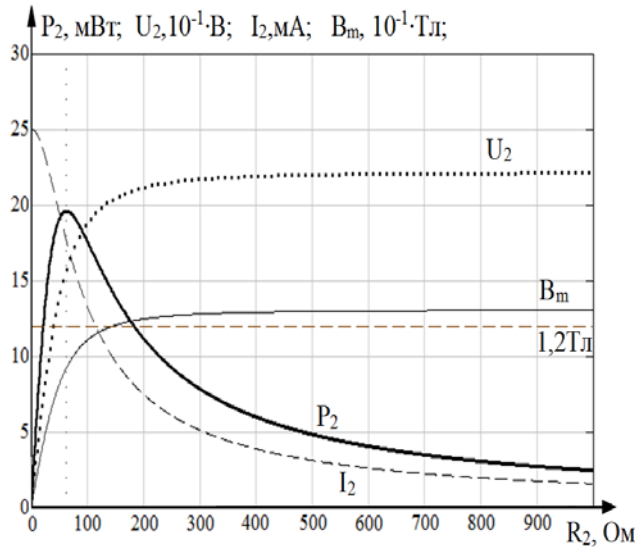


Рис. 3. Характеристики трансформатора для відбору потужності в залежності від опору навантаження

Найпридатнішим матеріалом осердя для такого типу трансформаторів є аморфні та нанокристалічні сплави. Прикладом такого матеріалу є ММ-11Н, який має такі параметри [7]:

- високу індукцію насичення магнітопроводу ($B_S \geq 1,2$ Тл);
- порівняно значну початкову магнітну проникність ($\mu = 30000 \dots 125000$);
- низьку коерцитивну силу та магнітострикцію;
- низькі втрати (для 50 Гц та індукції 1,2 Тл — $\Delta p = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 50^{1,4} \cdot 1,2^2 = 17$ мВт/кг);
- високу температурну стабільність (температура Кюрі > 605 °С).

На рис. 3 показані характеристики напруги, струму та потужності на виході, а також магнітної індукції у магнітопроводі в залежності від навантаження зі струмом у первинній обмотці 1,5 А для магнітопроводу МТ03215С-11-0026 з кількістю витків вторинної обмотки 80 та первинної — 1.

Для розрахунків потрібно знати амплітудне значення індукції у магнітопроводі у разі зміни навантаження. Для цього можна скористатися отриманою формулою

$$B_m = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T B(t)^2 dt} = \mu\mu_0 I_m w_1 R / \sqrt{(w_2^2 \mu\mu_0 S)^2 + R^2 l_{cp}^2} \quad (14)$$

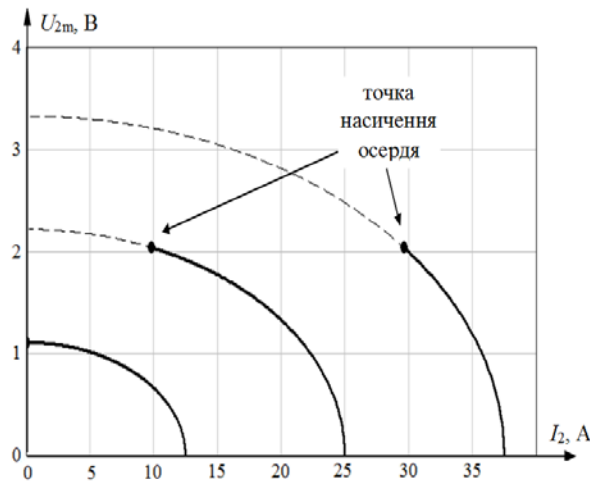


Рис. 4. Зовнішня характеристика трансформатора при струмі у первинній обмотці 1, 2 та 3 А

Опір вторинного кола R_{max} , за якого відбувається насичення магнітопроводу за умови індукції насичення B_S , буде визначатися

$$R_{max} = w_2^2 \mu\mu_0 \omega S B_S / \sqrt{(\mu\mu_0 I_m w_1)^2 - B_S^2 l_{cp}^2} \quad (15)$$

Як видно з формули (15), насичення виникає, якщо струм первинного кола має достатньо велике значення. Струм, за якого осердя не насичується з будь-яким навантаженням, буде розраховуватися за формулою

$$I_m \leq B_S l_{cp} / \mu\mu_0 w_1 \quad (16)$$

Виходячи з цього, можна побудувати залежність зміни напруги на виході трансформатора струму від струму навантаження (рис. 4). Де U_{2m} максимальне миттєве значення напруги за період.

На рис. 4 вказані точки насичення магнітопроводу. Тому за меншого струму розмагнічування вихідна напруга не буде мати несинусоїдальну форму, хоча максимальне миттєве значення напруги буде актуальним.

З рис. 4 видно, що з такими параметрами конструкції трансформатора струму за струмів 0,33 більших, ніж 2 А можна отримати напругу, достатню для живлення електроніки за достатньо великих вихідних струмів. Для повітряних ліній 10–35 кВ значення струму замикання складає від 2 до 15 А [5].

За більших значень струмів діючі нормативні документи вимагають застосування на районних підстанціях пристроїв для їх компенсації.

Слід зазначити, що потужність, яка відбирається від струму замикання, буде залежати від вихідного струму. На рис. 5 показані залежності потужності, що відбирається від струму замикання 1, 2 та 3 А з вищезазначеними параметрами конструкції магнітопроводу. На рис. 5 також вказані точки насичення магнітопроводу. Тому за меншого струму розмагнічування потужність, що відбирається, буде значно меншою, ніж розрахункова (пунктир).

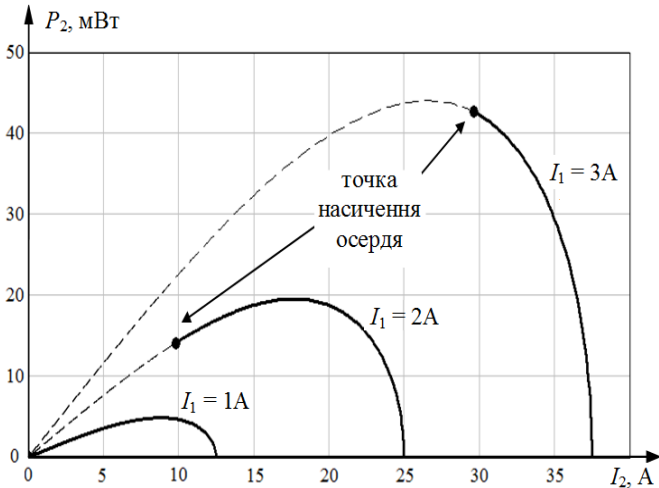


Рис. 5. Потужності, що відбирається від струму замикання (за струмів ОЗЗ 1, 2 та 3 А)

рактерний для розгалужених електричних мереж 10 кВ з ПЛ, у сільській місцевості та середньої потужності близько 15 мВт, що відбирається від струму замикання, час, достатній для накопичення енергії у 9 Дж, складатиме 10 хв. У разі більших струмів замикання час буде значно меншим. Після накопичення достатньої кількості енергії прилад майже миттєво надсилає повідомлення на диспетчерський пункт про місце ОЗЗ на ПЛ. Отже, цей час в 10 хв є максимально можливим часом ідентифікації місця ОЗЗ.

Слід зазначити, що для ОВБ такий час є прийнятним, оскільки він буде витрачений персоналом на збори після спрацювання на підстанції сигналізації про утворення ОЗЗ в електричній мережі. Після отримання повідомлення ОВБ виїде безпосередньо до місця замикання для його усунення.

Висновки

Встановлено, що запропонований підхід до побудови джерела живлення дозволяє відбирати достатньо енергії, яка може акумулюватися у ємнісному накопичувачі та використовуватися для живлення приладу під час надсилання повідомлення про місце пошкодження на ПЛ. Максимально можливий час накопичення енергії та відправки повідомлення про пошкодження складає 10 хв, протягом якого персонал ОВБ готується для виїзду на пошук місця пошкодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. А. Кучерявенков, і А. С. Карпашев, «Устройство для определения местоположения и вида поврежденных воздушной линии электропередач,» Патент России на полезную модель № 126144, 2013.
- [2] М. М. Черемісін, В. М. Зубко, В. О. Коробка, Г. А. Сідоров, і А. А. Пироженко, «Фіксатор короткого замикання,» Патент України № 64352 А, 2004.
- [3] В. М. Зубко, В. О. Коробка, і О. В. Мірошник, «Ефективність моніторингу замикань в мережах з ізолюваною нейтраллю,» Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, вип. 102, с. 21-23, 2010.
- [4] Інструкція з експлуатації, Комплект індикаторів короткого замикання ІКЗ-В33-У3. [Електронний ресурс], Режим доступу: <http://www.antraks.ru/biblioteka/normativnaya-dokumentatsiya?download=104:komplekt-indikatorov-korotkogo-zamykaniya-ikz-v33-u3>, дата звернення 10.02.2018.
- [5] В. М. Безручко, Р. О. Буйний, А. Ю. Строгий, і В. І. Ткач, «Використання GSM технологій при ідентифікації місць однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю зі штирьовою ізоляцією,» Технічна електродинаміка, № 5, с. 96-99, 2018. <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.096>.

[6] V. Bezruchko, R. Buinyi, A. Strogii, and V. Tkach, "Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems," *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), IEEE Proceedings*, pp. 84-87, 2019. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>.

[7] McLyman Colonel Wm. T. *Transformer and Inductor Design Handbook*, Fourth Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, 667 p.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.05.2020

Безручко Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних систем і мереж, e-mail: slavajm@meta.ua ;

Буйний Роман Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних систем і мереж, e-mail: buinyiroman@gmail.com ;

Ткач Володимир Іванович — аспірант кафедри електричних систем і мереж, e-mail: v.tkach1972@gmail.com .

Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів

V. M. Bezruchko¹

R. O. Buinyi¹

V. I. Tkach¹

Power-take-off from Single-phase-to-earth Fault Current to Power Supply Identification Devices

¹Chernihiv National University of Technology

In Ukraine, 6–35 kV electric networks operate in isolated neutral mode, which allows the networks to remain operational when single-phase-to-earth fault takes place. However, the presence of such a fault increases the possibility of interphase fault. Therefore, these faults are to be eliminated as quickly as possible. Existing devices can only narrow the search area to the detected branch from the overhead line, then an emergency crew has to find the fault by going along the line and inspecting it visually. The authors proposed an innovative device for identifying the single-phase-to-earth fault, which allows to determine the location of a fault with accuracy to the overhead line support, provided that such devices are available on each support. Such a device, having identified the presence of a single-phase-to-earth fault on the support, sends a message through the GSM network to the control center. The paper analyzes the possible power sources of such a device. It is proposed to power the device directly from the fault current. It is proposed to perform power take-off from the current through the metal grounding of the support using a special transformer that will maximize power take-off and maintain the integrity of the support ground loop. There has been proposed a mathematical model, which allows to calculate the parameters of the operating mode of such a transformer at various values of the fault currents and its dimension. It is shown that the proposed approach to the construction of a power source allows selecting enough energy that can be accumulated in capacitive storage and used to power the device while sending a message about the place of fault on the overhead line. It is shown that the maximum time of energy storage and sending messages can reach 10 minutes. During this time, the emergency crew should prepare for departure to search for the fault.

Keywords: 6–35 kV electric networks, electric networks with isolated neutral, single-phase-to-earth fault, fault location, power-take-off from fault.

Bezruchko Viacheslav M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Power Systems and Networks, e-mail: slavajm@meta.ua ;

Buinyi Roman O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Power Systems and Networks, e-mail: buinyiroman@gmail.com ;

Tkach Volodymyr I. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Power Systems and Networks, e-mail: v.tkach1972@gmail.com

В. М. Безручко¹
Р. А. Буйный¹
В. И. Ткач¹

Отбор мощности от тока однофазного замыкания на землю для питания прибора идентификации замыкания

¹Черниговский национальный технологический университет

Электрические сети напряжением 6–35 кВ в Украине работают в режиме с изолированной нейтралью, что позволяет сохранять работоспособность при возникновении однофазных замыканий на землю. Однако наличие таких замыканий увеличивает вероятность образования межфазных коротких замыканий. Поэтому их пытаются устранить как можно быстрее. Существующие устройства позволяют лишь сузить зону поиска до обнуленного ответвления от магистрали воздушной линии, а повреждения должно быть найдено во время обхода персоналом трассы линии и визуального ее контроля. Предложенное авторами инновационное устройство идентификации однофазных замыканий на землю позволяет определить место замыкания с точностью до опоры воздушной линии при условии наличия такого устройства на каждой опоре. Такой прибор при идентификации наличия однофазного замыкания на землю на опоре отправляет сообщение через GSM сеть сотовой связи в диспетчерский пункт. Проведен анализ возможных источников питания такого устройства. Предложено питать устройство непосредственно от тока замыкания. Отбор мощности от тока через металлический спуск заземления опоры предлагается выполнять с помощью специального трансформатора, что обеспечит максимизацию отбора мощности и сохранит целостность контура заземления траверсы опоры. Предложена математическая модель, позволяющая рассчитать параметры режима работы такого трансформатора при различных значениях токах замыкания и его габаритных характеристик. Установлено, что предложенный подход к построению источника питания позволяет отбирать достаточно энергии, которая может аккумулироваться в емкостном накопителе и использоваться для питания прибора при отправке сообщения о месте повреждения на воздушной линии. Установлено, что максимальное время накопления энергии и, как следствие, отправки сообщения о повреждениях, может достигать 10 минут, за которые персонал оперативно-выездной бригады должен подготовиться для выезда к месту повреждения.

Ключевые слова: электрические сети 6–35 кВ, электрические сети с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, поиск места замыкания, отбор мощности.

Безручко Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры электрических систем и сетей, e-mail: slavajm@meta.ua ;

Буйный Роман Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических систем и сетей, e-mail: buinyiroman@gmail.com ;

Ткач Владимир Иванович — аспирант кафедры электрических систем и сетей, e-mail: v.tkach1972@gmail.com