

УДК 621.311.1: 621.316.37 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.111-118](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.111-118)

А. І. Котиш, доц., канд. техн. наук, В. В. Зінзура, доц., канд. техн. наук,
Н. Ю. Гарасьова, доц., канд. техн. наук, О. І. Сіріков, доц., канд. техн. наук,
В. П. Солдатенко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: akotysh@gmail.com

Підвищення точності визначення місця виникнення короткого замикання в електричних мережах номінальною напругою 110-150 кВ

На основі аналізу схеми нормального режиму мережі 150 кВ ПрАТ «Кіровоградобленерго» встановлено, що існує ряд підстанцій, де встановлення фіксаторів короткого замикання просто необхідно для виявлення відгалуження на лінії електропередач, де виникло пошкодження. Запропоновано на базі розробленого пристрою електромеханічного фіксатора короткого замикання для повітряних мереж напругою 110-150 кВ запровадження радіоканалу для передачі інформації про стан мережі та місця пошкодження до чергового персоналу.

лінія електропередач, коротке замикання, електрична мережа, фіксатор, ізоляція

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку електроенергетики важливу роль відіграє питання надійності роботи високовольтних електричних мереж. В процесі експлуатації таких електричних мереж неминуче виникають аварійні ситуації, найнебезпечнішими з яких є короткі замикання (КЗ). В електричних мережах високої та середньої напруги кількість пошкоджень може досягати більше сотні випадків на рік [1, 2]. Визначення місця пошкодження (ВМП) електричної мережі є найбільш складною, тривалою та трудомісткою технологічною операцією. Витрати на ВМП організацій, що займаються експлуатацією електричних мереж, становлять значну частину експлуатаційних коштів. В той же час частка витрат на пристрої для ВМП в загальних витратах відносно мала. Це, в першу чергу, пов'язано з недосконалістю існуючих пристроїв для ВМП в електричних мережах. Зважаючи на це, задача удосконалення конструкції пристроїв для ВМП, використання яких значно зменшить рівень експлуатаційних витрат на електричні мережі, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових публікацій показав, що в теперішній час розроблено велику кількість пристроїв для ВМП. Питанню визначення місця ушкодження присвячена чимала кількість робіт як вітчизняних, так і закордонних учених [3, 4, 5]. Основний внесок у теорію та практику ВМП ліній електропередачі (ЛЕП) внесли А.І. Айзенфельд, В.М. Кутін, Г.М. Шалит, Е.А. Аржанніков, С.С. Саухатас, В.Н. Аронсон, Ю.А. Лямец та ін. Найбільшого поширення в електричних мережах набули пристрої типу ФІП (ФІП-1, ФІП-2, ФІП-Ф), ЛИФП [6]. Враховуючи, що фіксуючі прилади здійснюють автоматичне вимірювання та фіксацію електричних параметрів режиму мережі під час КЗ, вони повинні забезпечувати:

- високу швидкодію – вимірювання параметрів повинно відбуватися за період часу від моменту виникнення короткого замикання до моменту початку відключення пошкоджених ділянок ЛЕП системами релейного захисту (до 0,1 с);

© А. І. Котиш, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова, О. І. Сіріков, В. П. Солдатенко, 2022

- достатню точність вимірювання – відносна похибка вимірювання не повинна перевищувати 5%;

- можливість тривалого зберігання фіксованих параметрів – прилад повинен забезпечувати зберігання зафіксованих значень параметрів режиму протягом часу, достатнього для прибуття на підстанцію оперативної виїзної ремонтної бригади (не менше 4 год.);

- можливість автоматичного селективного запуску приладів з метою фіксації контрольованих параметрів лише у випадку аварійних відключень ліній.

Таким чином, для виявлення та пошуку місця КЗ необхідна наявність апаратного комплексу, що складається з таких підсистем [7]:

- системи релейного захисту для здійснення фіксації пошкоджень і відключення пошкодженої зони від мережі;

- системи дистанційного вимірювання для звуження (локалізації) зони пошуку пошкодження.

Проте, для випадку ЛЕП з великою кількістю відгалужень значної протяжності (рис. 1) описана система в більшості випадків не здатна правильно визначити відгалуження, на якому відбулось КЗ.

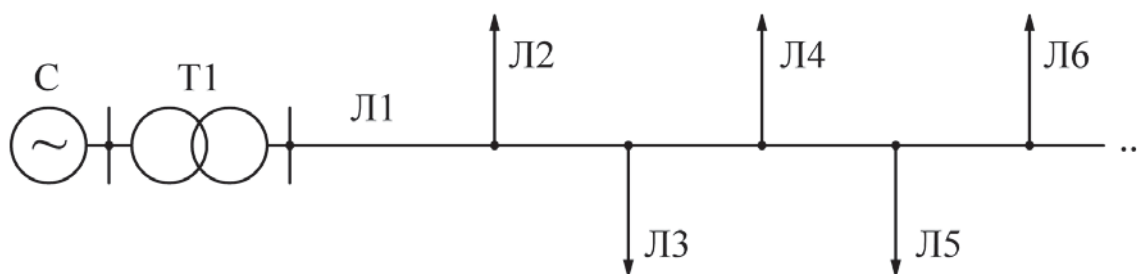


Рисунок 1 – Схема електричної мережі напругою 110-150 кВ, що містить ЛЕП з великою кількістю відгалужень

Джерело: розроблено авторами

Одним із шляхів вирішення проблеми підвищення точності визначення місця КЗ в електричній мережі є застосування спеціальних технічних засобів – фіксаторів короткого замикання (ФКЗ).

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 110-150 кВ за рахунок застосування розробленого пристрою ФКЗ, що використовує радіоканал для передачі інформації.

Виклад основного матеріалу. Для проведення дослідження було використано схему нормального режиму електричної мережі 150 кВ ПрАТ Кіровоградобленерго. Проведений аналіз конфігурації зазначеної мережі показав, що в ній наявна певна кількість підстанцій, які отримують живлення по ЛЕП, що являють собою глухі відгалуження. Тому встановлення ФКЗ на таких лініях є необхідним. На теперішній час розроблені авторами пристрої ФКЗ [8, 9] успішно експлуатуються в електричних мережах ПрАТ «Кіровоградобленерго». Основними перевагами розроблених пристроїв ФКЗ є простота конструкції та зручність в експлуатації. Фіксатор короткого замикання необхідно встановлювати на фазному проводі в будь-якому зручному для спостереження місці. Проте для зменшення механічного впливу на пристрій (вібрацій, коливань від поривів вітру) найбільш доцільно встановлювати його поблизу опори між віброгасником і ізолятором (рис. 2).

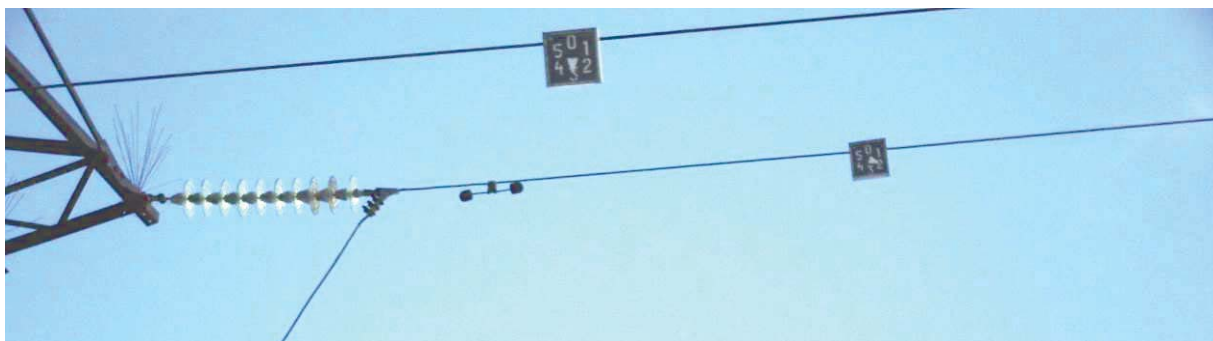


Рисунок 2 – Розміщення ФКЗ на лінії електропередачі

Джерело: розроблено авторами

Проте, описані пристрої мають суттєвий недолік: їх конструкція не передбачає передачу інформації про параметри аварійного режиму мережі на диспетчерський пункт. Це спричиняє значні додаткові витрати, пов'язані із необхідністю візуального контролю кожного з пристроїв ФКЗ для визначення відгалуження на якому сталося КЗ. Наявність можливості передавання інформації про параметри аварійного режиму від ФКЗ до диспетчерського пункту дозволить відправити бригаду ОВБ одразу до пошкодженого відгалуження, що в свою чергу зменшить витрати часу та транспортні витрати на пошук місця пошкодження.

Авторами статті запропоновано використання радіоканалу для передачі інформації про стан мережі від ФКЗ до диспетчерського пункту. Найбільш доцільними способами організації радіоканалу є:

- використання GSM мереж;
- використання передавачів неліцензійних частот, наприклад, діапазону 433/868 МГц. Розглянемо більш детально переваги та недоліки кожного із зазначених способів організації радіоканалу.

1. *Застосування GSM модемів.* Цей спосіб організації радіоканалу є достатньо простий лише при наявності покриття в місці встановлення ФКЗ. Для його реалізації найбільш доцільно використати готовий радіомодуль – GSM модем. Але зазначений спосіб реалізації радіоканалу має ряд суттєвих недоліків, головним з яких є відносна складність забезпечення живлення GSM модему. Для випадку неперервної роботи GSM модему його живлення можна забезпечити або безпосередньо від ЛЕП (із використанням ємнісних дільників напруги, трансформаторів напруги), або шляхом застосування автономних сонячних електростанцій невеликої потужності. Це, в свою чергу значно підвищить вартість пристрою та знизить ефективність його застосування. Можливий випадок короткочасного ввімкнення GSM модему лише на час передачі інформації. Але, за такого підходу, GSM модем також потребуватиме відносно великої кількості енергії (лише на реєстрацію в мережі GSM потрібно до 15 с при роботі модему з потужністю 1-3 Вт). Це в свою чергу, вимагає використання акумуляторів в схемі живлення GSM модему. Наявність акумуляторів в схемі живлення модему передбачає їх заміну через 5-7 років, що ускладнює експлуатацію ФКЗ. До того ж, використання GSM модему пов'язане із необхідністю оплати послуг зв'язку за певним тарифним планом.

2. *Використання прийомо-передавачів неліцензійних частот.* Цей спосіб організації радіоканалу є більш складним, адже він потребує врахування багатьох факторів при проектуванні, таких як вибір неліцензованої частоти, вибір антен, визначення потужності передавачів, врахування характеру місцевості та відстані між

приймачем та передавачем і т.д. Проте суттєвою перевагою даного способу передачі інформації, в порівнянні із використанням GSM модему, є відносно невелика кількість енергії, яка необхідна для короткочасної роботи передавача. Одним з найдоцільніших варіантів схеми живлення радіопередавача є використання енергії магнітного поля проводу (від робочого струму або струму КЗ) з накопиченням її в іоністорі або електролітичному конденсаторі. Зазначений спосіб живлення радіопередавача забезпечує тривалий термін експлуатації пристрою ФКЗ (до 20 років) та значне скорочення витрат на його обслуговування. До того ж, на відміну від використання мережі GSM, застосування неліцензійних частот виключає постійні грошові витрати.

До недоліків застосування прийомо-передавачів неліцензійних частот в якості каналу передачі інформації від пристрою ФКЗ до диспетчерського пункту є його дещо нижча надійність, в порівнянні із варіантом використання мережі GSM. До того ж такий спосіб організації радіоканалу потребує вирішення питання завадозахищеності на етапі проектування.

Основною задачею запропонованого в роботі радіофіксатора КЗ є контроль значення фазного струму повітряної лінії електропередачі і передача інформації по радіоканалу про факт КЗ. Радіофіксатор необхідно встановлювати в місці відгалуження повітряної лінії електропередачі, а приймач радіосигналу – на найближчій підстанції з оперативним персоналом. Мінімальні відстані від місця встановлення ФКЗ до підстанцій з оперативним персоналом згідно даних ПрАТ «Кіровоградобленерго» наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Відстані від ФКЗ до підстанцій 150 кВ з оперативним персоналом

Назва підстанції	<i>L, км</i>
Центральна	6,6
Знам'янка-тягова (Шаровка)	14,2
Геолог	13,3
Кварцит-330	2,4
Березовка	16,7
ЗЧМ	12
Знамянка-тягова (Орбіта)	7,5
Жилселище	1,7
Максимальна відстань	16,7
Мінімальна відстань	1,7

Джерело: розроблено авторами

Як можна побачити із табл. 1, відстань для передачі інформації від ФКЗ по підстанції є відносно невелика (до 20 км).

Більшість діапазонів не ліцензованих частот знаходиться в області ультракороткохвильового (УКХ) діапазону 26,957–27,283 МГц (10 мВт), 433,075–434,79 МГц (10 мВт), 864–865 МГц (25 мВт) та ін. Особливістю УКХ діапазону є прямолінійне поширення радіохвиль у межах прямої видимості (рис. 3).

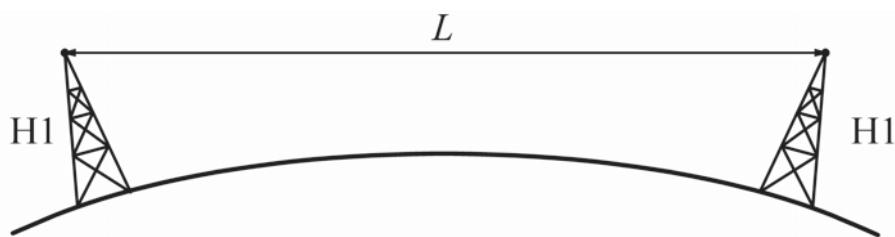


Рисунок 3 – Прямая видимість на радіолінії

Джерело: розроблено авторами

Орієнтовну дальність прямої видимості в L , м з урахуванням рефракції радіохвиль в УКХ діапазоні, можна визначити за формулою [10]:

$$L \approx 4,12 \cdot 10^3 (\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}), \quad (1)$$

де H_1, H_2 – відповідно висота приймальної та передавальної вишок, м.

Враховуючи те, що пристрій ФКЗ розташовується на проводі ЛЕП 150 кВ, а мінімальна висота підвісу такого проводу згідно ПУЕ складає 6 м, то саме це значення і приймемо, як розрахункове.

З формули (1) шляхом перетворень отримаємо вираз для визначення мінімальної висоти вишки приймальної станції:

$$H_1 = \left(\frac{L}{4,12 \cdot 10^3} - \sqrt{H_2} \right)^2 = \left(\frac{16,7 \cdot 10^3}{4,12 \cdot 10^3} - \sqrt{6} \right)^2 = 2,57 \text{ м}. \quad (2)$$

Основні вимоги, що висуваються до радіоканалу передачі інформації від пристрою ФКЗ до диспетчерського пункту:

- використання не ліцензованих частот;
- застосування частотної модуляція, як такої, що має більш високий рівень завадозахищеності.

Проведемо розрахунок максимальної теоретичної відстані роботи радіоканалу. Для цього використаємо формулу визначення потужності сигналу на вході радіоприймального пристрою [10], Вт:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}} (Вт) G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (3)$$

де $P_{\text{прм}}$ – потужність сигналу на вході радіоприймача;

$P_{\text{прд}}$ – потужність сигналу на виході радіопередавача;

λ – довжина хвилі радіосигналу;

r – відстань між приймачем і передавачем;

$G_{\text{прд}}$ – коефіцієнт підсилення антени радіопередавача (в разях);

$G_{\text{прм}}$ – коефіцієнт підсилення антени радіоприймача (в разях)

Виразивши з виразу (3) значення відстані r між передавачем та приймачем, отримаємо:

$$r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{P_{\text{прм}}}}, \quad (4)$$

Довжина хвилі для частоти 433 МГц складає $\lambda = 0,692$ м.

Таким чином, підставивши всі дані в (4) отримаємо

$$r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{0,005 \cdot 1,58 \cdot 1,63 \cdot 0,692^2}{1 \cdot 10^{-13}}} = 19760 \text{ м} = 19,76 \text{ км}.$$

Таким чином, отримане значення теоретичної дальності передачі (19,76 км) виявилось білим, за максимальну відстань між місцем встановлення ФКЗ та підстанцією (16,7 км). Це свідчить про можливість застосування радіоканалу на не ліцензійних частотах в якості каналу зв'язку для передачі інформації між пристроєм ФКЗ та диспетчерським пунктом (підстанцією 150 кВ).

Слід відмітити, що проведений розрахунок є досить наближеним, і не враховує послаблення сигналу при проходженні крізь перешкоди. Для визначення можливості використання радіоканалу для передачі інформації від ФКЗ до диспетчерського пункту необхідно проводити додаткові експериментальні дослідження.

В якості джерела живлення передавача ФКЗ та одночасно і датчика струму КЗ авторами було запропоновано використати пристрій на основі котушки Роговського [11]. Перевагою такого способу живлення є його відносно невелика вартість та простота монтажу.

Висновки.

1. Впровадження нових, прогресивних методів та засобів визначення місць пошкоджень в сучасних умовах має значний економічний ефект, обумовлений запобіганням переходу нестійких пошкоджень у стійкі, зменшенням часу перерв електропостачання, зменшенням об'єму ремонтних робіт, зниженням транспортних витрат тощо.

2. Аналізуючи схему нормального режиму мережі 150 кВ ПрАТ «Кіровоградобленерго» можна констатувати, що є ряд підстанцій де встановлення фіксаторів короткого замикання просто необхідно. Запровадження радіоканалу для передачі інформації про стан мережі від ФКЗ до чергового персоналу підстанції дозволить зменшити час, а також транспортні витрати на пошук пошкодження.

3. Проведені орієнтовні розрахунки, які підтверджують можливість створення радіоканалу для передачі інформації від ФКЗ на відстань до 20 км, з використанням прийомо-передавачів не ліцензійних частот (433 МГц). Для врахування послаблення радіосигналу при проходженні крізь перешкоди необхідно проводити дослідження в умовах конкретної місцевості.

Список літератури

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. Москва: Энергоиздат, 1982. 312 с.
2. Айзенфельд, А.И., Шалыт Г.М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. Москва: Энергия, 1977. 208 с.
3. Кузнецов, А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 94 с.
4. Кутин, В.М., Кульматицкий О.И. Диагностирование электрических распределительных сетей. Киев: Техніка, 1993. 160 с.
5. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. Москва: НТФ «Энергопрогресс», 1988. 64с.
6. Айзенфельд А.И., Аронсон В.Н., Гловацкий В.Г. Фиксирующие индикаторы тока и напряжения ЛИФП-А, ЛИФП-В, ФПТ и ФПН. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 88 с.
7. Егорова О.Ю., Егоров О.Б., Карова Т.А. Порівняльний аналіз методів визначення місця пошкодження ПЛЕП. *Системи озброєння і військова техніка*. 2009. №2(18). С. 141-144.
8. Плешков П.Г., Котиш А.І., Сіріков О.І. Розробка фіксатора коротких замикань для повітряних ліній електропередач напругою 110-150 кВ. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 42. С. 8-11.

9. Котиш А.І., Плешков П.Г., Орлович А.Ю., Сіріков О.І., Некрасов А.В. Розробка та експериментальне дослідження фіксатора коротких замикань для повітряних електричних мереж напругою 110-150 кВ. *Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2016. Вип. 29. С. 228-235.
10. Выходная мощность сигнала передатчика. / веб-сторінка URL: <http://digteh.ru/UGFSvSPS/power> (дата звернення: 18.12.2021).
11. Что такое пояс Роговского – описание, применение, устройство. веб-сторінка URL: <https://elektronchic.ru/avtomatika/chto-takoe-poyas-rogovskogo.html> (дата звернення: 18.12.2021).

References

1. Shalyt, G.M. (1982). *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyah [Determining fault locations in electrical networks]*. Moscow: Energoizdat [in Russian].
2. Ayzenfel'd, A.I., & Shalyt, G.M. (1977). *Opredelenie mest korotkogo замыкания на линиях с отвлечением [Locating short circuits on branch lines]*. Moscow: Energiya [in Russian].
3. Kuznetsov, A.P. *Opredeleniye mest povrezhdeniya na vozdukhnykh liniyakh elektroperedachi [Determination of damage locations on overhead power lines]*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
4. Kutin, V.M., & Kul'matitskiy, O.I. (1993). *Diagnostirovaniye elektricheskikh raspredelitel'nykh setey [Diagnostics of electrical distribution networks]*. Kyiv: Tekhnika [in Russian].
5. Arzhannikov, E.A., & Chukhin, A.M. (1988). *Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi [Methods and devices for determining the location of damage on power lines]*. Moscow: STF «Energoprogress» [in Russian].
6. Ajzenfel'd, A.I., Aronson, V.N., & Glovackij, V.G. (1989). *Fiksiruyushchie indikatory toka i napryazheniya LIFP-A, LIFP-V, FPT i FPN [Fixing current and voltage indicators LIFP-A, LIFP-V, FPT and FPN]*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
7. Ehorova, O.Yu., Ehorov, O.B., & Karova T.A. (2009). Porivnialnyi analiz metodiv vyznachennia mistisia poshkodzhennia PLEP [Comparative analysis of methods for determining the location of OPL damage]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – Weapons Systems and Military Equipment*, 2(18), 141-144 [in Ukrainian].
8. Plieshkov, P.H., Kotysh, A.I., & Sirikov, O.I. (2015). Rozrobka fiksatora korotkykh замыкан для повітряних ліній електропередач напругою 110-150 кВ [Development of a short circuit clamp for overhead power lines with a voltage of 110-150 kV]. *Visnyk NTU «KhPI»*. – *Bulletin of NTU «KhPI»*, 42, 8-11 [in Ukrainian].
9. Kotysh, A.I., Plieshkov, P.H., Orlovych, A.Yu., Sirikov, O.I., & Nekrasov A.V. (2016). Rozrobka ta eksperymentalne doslidzhennia fiksatora korotkykh замыкан для повітряних електричних мереж напругою 110-150 кВ [Development and experimental study of short-circuit latch for overhead electrical networks with a voltage of 110-150 kV]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia. – Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 29, 228-235, [in Ukrainian].
10. Vyhodnaya moshchnost' signala peredatchika [Transmitter signal output power]. *digteh.ru*. Retrieved from <https://digteh.ru/UGFSvSPS/power/> [in Russian].
11. Chto takoe poyas Rogovskogo – opisanie, primenenie, ustroystvo [What is a Rogowski belt - description, application, device] . *elektronchic.rul*. Retrieved from elektronchic.ru/avtomatika/chto-takoe-poyas-rogovskogo.html [in Russian].

Andrii Kotysh, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Harasova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Accuracy of Determining the Location of Short Circuits in Electrical Networks with a Nominal Voltage of 110-150 kV

The article is devoted to the study of improving the efficiency of the electric network with a voltage of 110-150 kV through the use of a developed device FKZ, which uses a radio channel to transmit information.

At the present stage of development of electric power industry the question of reliability of work of high-voltage electric networks plays an important role. During the operation of such electrical networks, emergencies inevitably occur, the most dangerous of which are short circuits. Determining the location of damage to the electrical network is the most complex, time-consuming and time-consuming technological operation with significant costs. Therefore, the task of improving the design of devices to determine the location

of damage, the use of which will significantly reduce the level of operating costs for electrical networks, is relevant.

One of the ways to solve the problem of improving the accuracy of determining the location of a short circuit in the electrical network is the use of special technical means - short circuit clamps.

The scheme of the normal regime of the 150 kV electric network of PJSC Kirovogradoblenergo was used for the research. The analysis of the configuration of this network showed that it has a number of substations that receive power from transmission lines, which are deaf branches. Therefore, the installation of short-circuit latches on such lines is necessary.

The authors of the article propose the introduction of a radio channel to transmit information about the state of the network and the place of damage to the next personnel of the substation. The most appropriate ways to organize a radio channel are: the use of GSM networks; use of unlicensed frequency transmitters.

Approximate calculations have been carried out, which confirm the possibility of creating a radio channel for transmitting information from the short-circuit lock for a distance of up to 20 km, using transceivers of non-licensed frequencies.

power line, short circuit, electrical network, lock, isolation

Одержано (Received) 04.01.2022

Прорецензовано (Reviewed) 19.01.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022