

КОШМАН ВСЕВОЛОД ІВАНОВИЧ – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, Інститут електродинаміки НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6473-9478>; e-mail: koshman@ied.org.ua.

САБАРНО ЛЮДМИЛА РОСТИСЛАВІВНА ✉ – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, Інститут електродинаміки НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2153-2183>; e-mail: sabarno@ukr.net.

СЕВАСТЮК ІГОР МИХАЙЛОВИЧ – молодший науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, Інститут електродинаміки НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1971-3345>; e-mail: sevastuk@ukr.net.

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ОБРИВУ ПРОВОДУ У ТРИФАЗНІЙ РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ

Для запобігання аварійним режимам в лініях електропостачання 6–35 кВ при обриві фазного про-воду в прольоті зі сторони живлення в роботі проведено аналіз струмів і напруг на силових трансформаторах лінії при обриві проводу на сторонах високої і низької напруг. Розглянуто можливість встановлення факту обриву проводу за допомогою пристроїв, встановлених в кінці розгалуженої лінії з подальшою передачею сигналу про обрив проводу в її початок, що дозволить суттєво підвищити чутливість захисту. Розглянуто випадок, коли на обмотках силового трансформатора, до вторинної обмотки якого приєднаний пристрій контролю обриву проводу. Розглянуто випадок, коли при з'єднанні обмоток вказаного трансформатора за схемою «зірка/зірка» з нульовим проводом у випадку обриву проводу однієї з фаз, наприклад, фази А, на фази В та С трансформатора буде подана лінійна напруга, яка за умови симетричного навантаження розподілиться між фазами В та С навпіл. Наведено рівняння розподілу струмів та напруг на обмотках трансформатору та встановлено, що найбільше значення суми напруг на двох сусідніх фазах при обриві проводу буде дорівнювати падінню напруги на обмотці трансформатора при максимальному навантаженні, що суттєво менше значення фазної напруги при нормальному режимі. Аналогічно розглянуто випадок, коли обмотки силового трансформатора, до вторинної сторони якого приєднаний пристрій контролю обриву проводу, з'єднані за схемою «трикутник/зірка» з нульовим проводом, і при обриві проводу однієї із фаз, наприклад фази А, на первинну обмотку цього трансформатора, що приєднана до фази В та С, буде подана лінійна напруга. Встановлено, що найбільше значення різниці напруг на двох сусідніх фазах при обриві проводу буде дорівнювати половині падіння напруги на обмотці трансформатора при максимальному навантаженні, що суттєво менше значення фазної напруги при нормальному режимі. Таким чином, запропоновано вважати ознаками обриву проводу в розподільній електричній мережі рівність напруг за модулем і зсув фаз на 180° на стороні низької напруги силового трансформатора, якщо його обмотки з'єднані за схемою «зірка/зірка» з нульовим проводом; рівність напруг на двох фазах, як за модулем, так і за фазою на стороні низької напруги силового трансформатора, якщо його обмотки з'єднані по схемі «трикутник/зірка» з нульовим проводом. Застосування наведених ознак обриву проводу в електричних мережах напругою 6–35 кВ дозволить з високою надійністю виявляти пошкодження лінії незалежно від її конфігурації, протяжності та схем з'єднання силових трансформаторів.

Ключові слова: розподільні мережі 6–35 кВ; комутаційна апаратура; визначення місця пошкодження; обрив проводу; однофазні замикання на землю.

Вступ. Протяжність повітряних розподільних мереж напругою 6–35 кВ в Україні перевищує 300 тис. км, що становить близько третини всієї довжини мереж. Вони розгалужені, просторово розподілені та значною мірою піддаються впливу зовнішніх чинників, через що є найбільш ненадійним елементом систем електропостачання. У розподільних мережах цього класу напруги застосовується різноманітна комутаційна апаратура. Для побудови мереж використовуються різні марки проводів, при цьому на одному приєднанні може застосовуватися від двох до шести типів провідників. Використання роз'єднувачів і вимикачів різних типів, компенсаційних пристроїв, а також засобів автоматики та вимірювальних приладів ще більше ускладнює конструктивне виконання таких систем. Найбільш неоднорідними за цими параметрами є мережі сільськогосподарського призначення.

Складна структура систем електропостачання (СЕП) напругою 6–35 кВ безпосередньо впливає на засоби релейного захисту і автоматики (РЗА), а також на точність методів визначення місця пошкодження (ВМП). Розподільні мережі цього класу є просторово розподіленими, мають деревоподібну структуру та

відносно автономність, а відмова електропостачання у них призводить до значних економічних збитків. Залежно від призначення мережі можуть мати 4–6 ієрархічних рівнів. При аварійних режимах, зокрема під час пошуку місць однофазних замикань на землю (ОЗЗ), складна та розгалужена структура повітряних ліній (ПЛ) створює значну невизначеність, особливо у випадках обриву проводу, якщо він відбувся не на початку лінії і до місця обриву приєднані відгалуження.

Режим роботи СЕП 6–35 кВ характеризується несиметричністю навантаження фаз різноманітністю і нерівномірністю добового навантаження та режимом заземлення нейтралі трансформаторів. Ці та багато інших факторів суттєво впливають на ефективність застосування методів ВМП, оскільки врахування їх впливу є на даний час складною задачею [1].

Особливою складністю відрізняється режим ОЗЗ, який супроводжується розривом фазного проводу в ПЛ і падінням його на землю. Режим нейтралі дозволяє релейному захисту діяти на сигнал і довгий час не вимикати ОЗЗ, що часто призводить до значних пошкоджень ізоляторів, загоряння опор, пошкодження заземлення опор, створює небезпечне поле розтікання



струму, в яке можуть потрапити тварини чи люди, впливає на умови роботи вимірювальних приладів та пристроїв РЗА [1, 2]. В більшості випадків на такий вид пошкодження не реагує жоден із захистів від замикання на землю. Тривале існування такого режиму є досить небезпечним. Тому існує необхідність вдосконалення методів попередження та засобів захисту від обриву проводу.

Існуючі пристрої захисту від несиметричних режимів, що базуються на виділенні струму зворотної послідовності, внаслідок їх низької чутливості у більшості випадків не реагують на обрив проводу. [3, 4]. Відомі також пристрої захисту від обриву проводу, які використовують ознаку знеструмлення пошкодженої фази, але вони мають обмежене застосування для мереж, які мають відгалуження. [5, 6].

Одним з більш досконалих є пристрій, що забезпечує вимірювання струму зворотної послідовності на протязі часу з моменту обриву проводу і до його падіння на землю, тобто з витримкою часу біля 1 с та напруги нульової послідовності після падіння проводу на землю, що і є ознакою виникнення однофазного замикання на землю внаслідок обриву проводу [7, 8]. Суттєвим недоліком цього пристрою є його низька чутливість при обриві проводу в кінці лінії, особливо при малих навантаженнях після місця обриву. В таких випадках значення струму зворотної послідовності найчастіше буде нижчим гранично допустимого в нормальному режимі і пристрій не буде нормально працювати.

Отже розробка нових, більш досконалих пристроїв захисту розгалужених електричних мереж від обриву проводу є актуальною задачею.

Метою роботи є встановлення ознак обриву проводу у розгалуженій повітряній мережі.

Результати дослідження. Існуючі пристрої захисту від обриву проводу розміщуються на живлячій підстанції, від шин якої відходять лінії електропостачання. Існує також можливість встановлення факту обриву проводу за допомогою пристроїв, встановлених в кінці розгалуженої лінії з подальшою передачею сигналу про обрив проводу в її початок, що дозволить суттєво підвищити чутливість захисту.

На рис. 1 наведено схему приєднання до розгалуженої електричної мережі такого пристрою захисту від обриву проводу, де: 1 – блок контролю обриву проводу, 2 – вихідний блок.

Розглянемо режим напруг на обмотках силового трансформатора, до вторинної обмотки якого приєднаний пристрій контролю обриву проводу.

При з'єднанні обмоток вказаного трансформатора за схемою «зірка/зірка» з нульовим проводом у випадку обриву проводу однієї з фаз, наприклад, фази А, на фази В та С трансформатора буде подана лінійна напруга U_{BC} , яка за умови симетричного навантаження розподілиться між фазами В та С навпіл [9]. Розподіл струмів та напруг на обмотках трансформатора наведено на рис. 2. Фазні напруги, при цьому будуть дорівнювати:

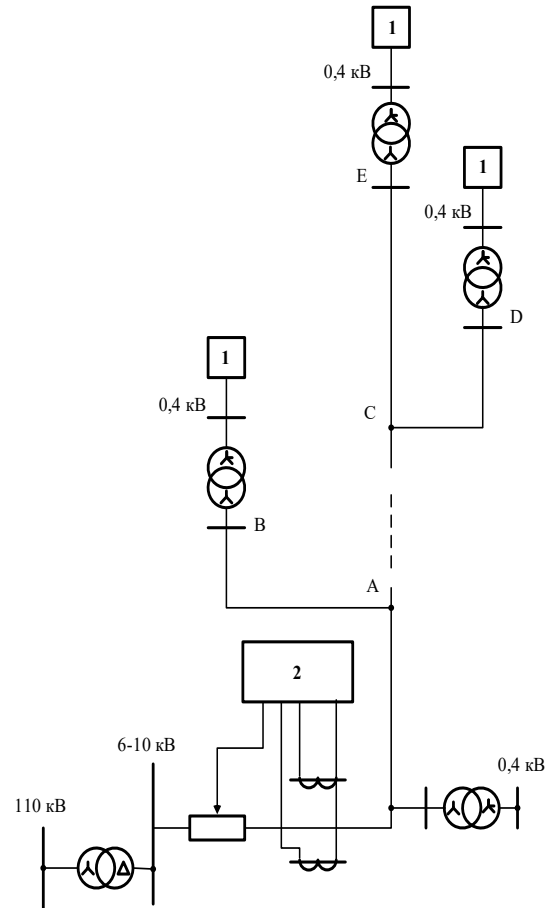


Рисунок 1 – Схема приєднання до розгалуженої електричної мережі пристрою захисту від обриву проводу

$$U_{B_{об}} = -\frac{U_{BC}}{2}; \quad U_{C_{об}} = \frac{U_{BC}}{2}, \quad (1)$$

звідси

$$U_{B_{об}} = -U_{C_{об}},$$

де $U_{B_{об}}$ та $U_{C_{об}}$ – діючі значення напруг на фазах В та С після обриву проводу на фазі А відповідно.

Таким чином, геометрична сума напруг двох сусідніх фаз при обриві на третій буде дорівнювати нулю.

Аналогічно розподіляться електрорушійні сили на вторинних обмотках силового трансформатора. Тобто $E_{b_{об}} = -E_{c_{об}}$.

У відповідності з цим, напруга на фазах буде:

$$U_{b_{об}} = E_{b_{об}} - \frac{E_{b_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_b}; \quad (2)$$

$$U_{c_{об}} = E_{c_{об}} - \frac{E_{c_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_c} = -E_{b_{об}} + \frac{E_{b_{об}} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_c}, \quad (3)$$

де $E_{b_{об}}$, $E_{c_{об}}$ – електрорушійна сила на фазах В та С відповідно;

Z_2 – опір фаз вторинної обмотки трансформатора;

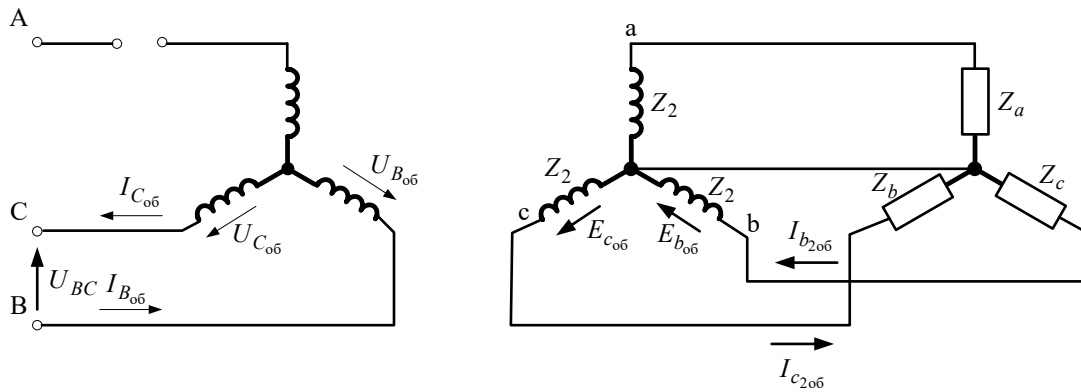


Рисунок 2 – Розподіл струмів та напруг при з’єднанні силового трансформатора за схемою «зірка/зірка» з нулем

Z_a, Z_b, Z_c – опір навантаження фаз А, В та С відповідно.

Як вже зазначалось, при рівних навантаженнях фаз напруги будуть однакові: $U_{b06} = -U_{c06}$. Різниця напруг буде найбільшою, якщо навантаження однієї з фаз, наприклад, фази В, мінімальне, а навантаження фази С має найбільше значення, тобто $Z_b = \infty$ і $Z_c = Z_{cmin}$ відповідно. У цьому випадку напруги в фазах будуть:

$$U_{b06} = E_{b06}; \quad (4)$$

$$U_{c06} = -E_{b06} + \frac{E_{b06} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_{cmin}}. \quad (5)$$

Сума напруг буде становити:

$$U_{b06} + U_{c06} = \frac{E_{b06} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_{cmin}}. \quad (6)$$

Таким чином, сума напруг на двох сусідніх фазах при обриві проводу буде дорівнювати падінню напруги на обмотці трансформатора при максимальному навантаженні.

Якщо ж обмотки силового трансформатора, до вторинної сторони якого приєднаний пристрій контролю обриву проводу, з’єднані за схемою «трикутник/зірка» з нульовим проводом, то при обриві проводу однієї із фаз, наприклад фази А, на первинну обмотку цього трансформатора, що приєднана до фази В та С, буде подана лінійна

напруга U_{BC} , тобто $U_{BC06} = U_{BC}$, а на інших двох обмотках ця лінійна напруга розділиться навпіл. Причому напрямки цих напруг буде протифазним напрузі U_{BC} . Таким чином, на обмотці, приєднаній до фаз А та В, буде напруга $U_{AB06} = -\frac{U_{BC}}{2}$, а на обмотці приєднаній до фаз С та А так само $U_{CA06} = -\frac{U_{BC}}{2}$. Розподіл напруг на обмотках трансформатора наведено на рис. 3.

Аналогічно розподіляться й електрорушійні сили на вторинних обмотках силового трансформатора, тобто:

$$E_{a06} = -\frac{E_{c06}}{2}; \quad E_{b06} = -\frac{E_{c06}}{2}. \quad (7)$$

Напруга на фазах трансформатора:

$$\begin{aligned} U_{c06} &= E_{c06} - \frac{E_{c06} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_c}; \\ U_{a06} &= -\frac{E_{c06}}{2} + \frac{E_{c06} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_a)}; \\ U_{b06} &= -\frac{E_{c06}}{2} + \frac{E_{c06} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_b)}. \end{aligned} \quad (8)$$

При рівних навантаженнях фаз:

$$U_{a06} = U_{b06}. \quad (9)$$

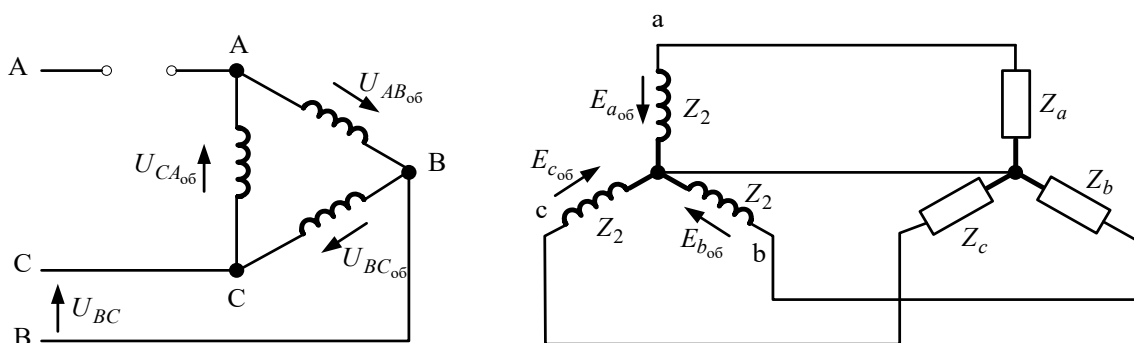


Рисунок 3 – Розподіл струмів та напруг при з’єднанні силового трансформатора за схемою «трикутник/зірка» з нулем

Різниця напруг буде найбільшою, якщо навантаження однієї з фаз, наприклад, фази А, мінімальне, а навантаження фази В має найбільше значення – тобто $Z_a = \infty$ і $Z_c = Z_{cmin}$ відповідно. Напруги в фазах будуть:

$$U_{a_{об}} = -\frac{E_{c_{об}}}{2}; \quad (10)$$

$$U_{b_{об}} = -\frac{E_{c_{об}}}{2} + \frac{E_{c_{об}} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_{bmin})}. \quad (11)$$

Різниця напруг буде становити:

$$U_{a_{об}} - U_{b_{об}} = -\frac{E_{c_{об}} \cdot Z_2}{2(Z_2 + Z_{bmin})}. \quad (12)$$

Таким чином, різниця напруг на двох сусідніх фазах при обриві проводу буде дорівнювати половині падіння напруги на обмотці трансформатора при максимальному навантаженні.

На відміну від обриву проводу на стороні високої напруги, при обриві на стороні низької напруги, що можливо при перегорянні запобіжника однієї з фаз, на двох інших фазах буде фазна напруга, зсунута одна відносно іншої на 120° [10].

Висновки. Отже, можна зробити висновок, що однією з ознак обриву проводу на стороні високої напруги може бути: рівність напруг за модулем і зсув фаз на 180° , якщо обмотки силового трансформатора з'єднані за схемою «зірка/зірка» з нульовим проводом; рівність напруг на двох фазах як за модулем, так і за фазою при з'єднанні обмоток силового трансформатора по схемі «трикутник/зірка» з нульовим проводом

Для запобігання аварійним режимам у лініях електропостачання напругою 6–35 кВ при обриві фазного проводу в прольоті зі сторони живлення, зокрема у випадку його падіння на землю, у роботі виконано аналіз струмів і напруг на силових трансформаторах лінії при обриві проводу на стороні високої та низької напруги. Проведені дослідження дозволили виявити найбільш інформативні ознаки обриву проводу на стороні 6–10 кВ, на основі яких сформовано концепцію системи діагностування і можна розробити принципову схему та побудувати експериментальний макет системи діагностування обриву проводу в розгалуженій електричній мережі напругою 6–10 кВ.

Список літератури

1. Advanced protection of overhead lines in the event of interrupted conductor / V. Lovrencic et al. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, Sweden, 10–13 June 2013. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1222>.
2. Сабарно Л. Р., Севастюк І. М. Дослідження впливу селективності роботи пристроїв релейного захисту на ізоляцію електричних мереж. *Сталій розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення*: Матеріали І Міжнародно-науково-практ. конф., м. Бережани, Україна, 5 листоп. 2020 р. Київ, 2020.

3. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник / уклад.: Д. П. Козарський, Е. В. Майструк, І. П. Козарський. 2-ге вид. Чернівці: Чернівецький національний університет, 2019. 133 с.
4. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. 533 с.
5. Пристрій захисту електричної мережі з ізолюваною або компенсованою нейтраллю від несиметричних режимів: пат. 64542 Україна: Н02Н3/24. № 2003065824; заявл. 24.06.2003; опубл. 16.02.2004, Бюл. № 2/2004.
6. Шкрабец Ф. П., Гребенюк А. Н. Защитное отключение при обрыве провода воздушной электрической сети. *Гірничі електромеханіка та автоматика*. 2005. № 75. С. 44–47.
7. Кутіна М. В. Система захисту від обриву проводу та пошук місця пошкодження в розподільних мережах напругою 6–35 кВ. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 46–47.
8. Кутін В. М., Кутіна М. В., Пасічник Я. С. Автоматизація процесу пошуку місця пошкодження в розподільних мережах напругою 6–35 кВ. *LI науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (HTKP VNTU–2022)*: Матеріали, м. Вінниця, 30–31 трав. 2022 р. Вінниця, 2022. С. 1695–1696.
9. Кошман В. І., Сабарно Л. Р., Севастюк І. М. Пристрій захисту розподільної електричної мережі від обриву проводу. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2015. № 40. С. 44–48.
10. Пристрій захисту електричної мережі з ізолюваною або компенсованою нейтраллю від обриву проводу: пат. 117026 Україна: Н02Н3/24. № a201602146; заявл. 04.03.2016; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 17/2017.

References

1. V. Lovrencic et al., "Advanced protection of overhead lines in the event of interrupted conductor," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, Sweden, Jun. 10–13, 2013. Institution Eng. Technol., 2013, doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1222>
2. L. R. Sabarno and I. M. Sevastiuk, "Doslidzhennia vplyvu selektyvnosti roboty prystroiv releinoho zakhystu na izoliatsiiu elektrychnykh merezh [A Study of the Effect of the Selectivity of Relay Protection Devices on the Insulation of Electrical Networks]," in *Sustainable Development of the Agricultural Sector: Engineering and Economic Support*, Berezhan, Ukraine, Nov. 5, 2020. Kyiv: Berezhan Agricultural Tech. Inst., separate branch Nat. Univ. Life Environmental Sci. Ukraine, 2020. (in Ukrainian)
3. D. P. Kozarskyi, E. V. Maistruk, and I. P. Kozarskyi, Comps., *Osnovy releinoho zakhystu ta avtomatyzatsii enerhosystem [The basics of relay protection and automation in power systems]*, 2nd ed. Chernivtsi: Chernivtsi Nat. Univ., 2019. (in Ukrainian)
4. V. P. Kidyba, *Releinyi zakhyst elektroenerhetychnykh system [Relay protection of power systems]*. Lviv: Publishing House Lviv Polytech. Nat. Univ., 2013.
5. F. P. Shkrabets, A. A. Shkrabets, O. V. Ostapchuk, and V. I. Hordenko, "Device for protecting electrical equipment in asymmetric modes of an earthed or compensated neutral system," Ukrainian Patent 64542, Feb. 16, 2004. (in Ukrainian)
6. F. P. Shkrabets and A. N. Hrebenuk, "Zashchytnoe otkliuchene pry obryve provoda vozdushnoi elektrycheskoi sety [Safety shutdown in the event of a broken wire in the overhead power line]," *Mining Electromechanics and Automation*, no. 75, pp. 44–47, 2005. (in Ukrainian)
7. M. V. Kutina, "System of protection from wire break search sites and damage in distribution networks voltage 6–35 kv," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 2, pp. 46–47, 2012. (in Ukrainian)
8. V. M. Kutin, M. V. Kutina, and Ya. S. Pasichnyk, "Avtomatyzatsiia protsesu poshuku mistsia poshkodzhennia v rozpodilnykh merezhakh napruhoiu 6–35 kV [Automation of the process for locating faults in 6–35 kV distribution networks]," in *The 11th Scientific and Technical Conference of the Departments of Vinnitsa National Technical University (STCD VNTU–2022)*, Vinnitsia, May 30–31, 2022. Vinnitsia: Vinnitsia Nat. Tech. Univ., 2022, pp. 1695–1696. (in Ukrainian)
9. V. I. Koshman, L. R. Sabarno, and I. M. Sevastjuk, "Protection against wire break in the electrical distribution

network.” *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 40, pp. 44–48, 2015. (in Ukrainian)

10. V. I. Koshman, L. R. Sabarno, and I. M. Sevastjuk, “A device for protecting an electrical network with an isolated or compensated neutral against a wire break,” Ukrainian Patent 117026, Jun. 11, 2018. (in Ukrainian)

Надійшла (Received) 06.03.2026

Прийнята (Accepted) 13.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.316.1

KOSHMAN VSEVOLOD – Candidate of Technical Sciences (PhD), Research Fellow of the Department of Power Supply Systems Optimization, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6473-9478>; e-mail: koshman@ied.org.ua.

SABARNO LIUDMYLA ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher Fellow of the Department of Power Supply Systems Optimization, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2153-2183>; e-mail: sabarno@ukr.net.

SEVASTYUK IGOR – Research Assistant of the Department of Power Supply Systems Optimization, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1971-3345>; e-mail: sevastuk@ukr.net.

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES FOR DETECTION OF WIRE BROKENNESS IN A THREE-PHASE DISTRIBUTION NETWORK

To prevent emergency modes in 6–35 kV power supply lines when a phase wire breaks in the span from the power side, the work analyzes the currents and voltages on the power transformers of the line when a wire breaks on the high and low voltage sides. The possibility of establishing the fact of a wire break using devices installed at the end of a branched line with subsequent transmission of a wire break signal to its beginning is considered, which will significantly increase the sensitivity of the protection. The voltage regime on the windings of a power transformer, to the secondary winding of which a wire break control device is connected, is considered. The case is considered when, when connecting the windings of the specified transformer according to the “star/star” scheme with a neutral wire in the event of a wire break of one of the phases, for example, phase A, a linear voltage will be supplied to phases B and C of the transformer, which, under the condition of a symmetrical load, will be divided between phases B and C in half. The equation for the distribution of currents and voltages on the transformer windings is given and it is established that the largest value of the sum of the voltages on two adjacent phases in the event of a wire break will be equal to the voltage drop on the transformer winding at maximum load, which is significantly less than the value of the phase voltage in normal mode. Similarly, the case is considered when the windings of a power transformer, to the secondary side of which a wire break control device is connected, are connected in a “delta/star” scheme with a neutral wire, and when the wire of one of the phases, for example phase A, breaks, a linear voltage will be applied to the primary winding of this transformer, which is connected to phases B and C. It is established that the largest value of the voltage difference on two adjacent phases in the event of a wire break will be equal to half the voltage drop on the transformer winding at maximum load, which is significantly less than the value of the phase voltage in normal mode. Thus, it is proposed to consider the signs of a wire break in a distribution electrical network as the equality of voltages in terms of modulus and a phase shift of 180° on the low-voltage side of a power transformer, if its windings are connected in a “star/star” scheme with a neutral wire; the equality of voltages on two phases, both in terms of modulus and in phase on the low-voltage side of a power transformer, if its windings are connected in a “triangle/star” scheme with a neutral wire. The use of the above signs of a wire break in electrical networks with a voltage of 6–35 kV will allow for highly reliable detection of line damage regardless of its configuration, length and power transformer connection schemes.

Keywords: 6–35 kV distribution networks; switching equipment; damage location; wire break; single-phase ground faults.