



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-11

УДК 621.311.243:681.5

С. В. Коробка <sup>1</sup> , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-4717-509X
І. Г. Стукалець <sup>1</sup> , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-7107-4865
М. І. Бабич <sup>1</sup> , канд. техн. наук	ORCID 0000-0003-1295-4162
С. В. Сиротюк <sup>1</sup> , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-9966-6299
О. Г. Скляр <sup>2</sup> , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-0456-2479
Б. В. Болтянський <sup>2</sup> , канд. техн. наук	ORCID 0000-0003-2072-4025
Р. В. Скляр <sup>2</sup> , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-1547-5100

<sup>1</sup> Львівський національний університет природокористування<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: korobkasv@ukr.net, тел.: +380989699534

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 0,38 кВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВІРТУАЛЬНО ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

*Анотація.* Максимально точне визначення місця пошкоджень на повітряних лініях електропередачі є важливим для забезпечення енергетичної безпеки, стабільності енергосистем і надійності електропостачання споживачів. Існують різні математичні методи, які використовуються для цього, зокрема методи відстані до несправності базуються на оцінці параметрів аварійного стану і широко застосовуються в цифрових релейних терміналах захисту та локаторах пошкоджень ліній електропередачі.

Ціль статті полягає в аналізі існуючих методів забезпечення енергетичної безпеки роботи ліній електропередач напругою 0,38 кВ в аварійних ситуаціях для визначення місця пошкодження кабелю і оцінки похибки з використанням параметрів аварійного стану.

Розроблена методика авторів дозволяє врахувати різноманітні фактори, включаючи похибки вимірювання струмів і напруг в аварійному стані, що суттєво впливають на точність визначення місця несправності повітряних ліній електропередач. Цей підхід дозволяє зменшити час, необхідний для проведення аварійно-відновлювальних робіт, шляхом більш точного визначення місця пошкодження кабелю та розміру оглядової зони.

*Ключові слова:* вимірювання, міст постійного струму, “Петля Муррея” та “Петля Варлея”, лінія електропередач

*Постановка проблеми.* На сьогодні під час обриву кабелю в розподільчих електричних мережах напругою 0,38 кВ визначення місця пошкодження є складною задачею, яка ставиться перед



інженерами. Під час визначення місця пошкодження кабелю лінії 0,38 кВ використовують наступні методи, а саме: ємнісний метод; акустичний метод; індукційний метод; метод заснований на вимірюванні імпедансу; метод біжучої хвилі; метод штучного інтелекту.

Наявні методи, які ефективно використовуються для розподільчих електричних мережах напругою 0,38 кВ, не підходять через їх особливості, такі як ізольовані нейтралі.

Крім, цього в лініях електропередач найчастіше використовуваним пристрої для визначення місця пошкодження ліній електропередач, наприклад ЦР0200, CFL-32st, ПОШУК-2016, Іскра-4 тощо [1]. Однак ефективність вище згаданих приладів є низька для мереж напругою 0,38 кВ. Ці мережі часто стикаються з однофазними замиканнями на землю, які прилади (ЦР0200, CFL-32st, ПОШУК-2016, Іскра-4) не може виявити. Крім того, дані пристрої, а саме ЦР0200, CFL-32st, ПОШУК-2016, Іскра-4, тощо мають високу вартість [1].

В інших країнах досліджуються різні методи визначення місця пошкодження, такі як: використання опору для гасіння дуги; використання інтелектуальних мереж для аналізу попередніх подій; вимірювання напруг у вузлах мережі для виявлення пошкоджень; вивчення коротких замикань через контактний опір.

Також розглядаються нові методи, такі як аналіз імпедансу, метод біжучої хвилі та метод штучного інтелекту, а також моделі навантаження для імітації різних аварійних ситуацій. Однак нинішні методи не завжди здатні точно визначити місце появи всіх можливих аварійних режимів. Крім, цього, немає спільної думки, щодо результатів розробки, методів, методики, математичної моделі, що дозволяє точно оцінити ризик пошкодження лінії 0,38 кВ, через зовнішніх (навколишніх) фактори в даному випадку аварійних факторів [2].

Всі методи базуються на теорії ймовірностей і математичних статистик. Таким чином, аналіз літературних джерел з питань підвищення енергетичної безпеки електрозабезпечення споживачів ліній електропередач 0,38 кВ дає підстави вважати потрібну аналітичну розробку математичної моделі із застосуванням системи моніторингу віртуально вимірювальних приладів. Тому, що одержана експериментально модель виявилась неефективною для синтезу цифрових систем керування.

Головні вимоги, що ставляться до математичної моделі – це максимально точне визначення місця пошкоджень на повітряних лініях електропередачі є важливим для забезпечення енергетичної безпеки, стабільності енергосистем і надійності електропостачання



споживачів. Існують різні математичні методи, які використовуються для цього, зокрема методи відстані до несправності базуються на оцінці параметрів аварійного стану і широко застосовуються в цифрових релейних терміналах захисту та локаторах пошкоджень ліній електропередачі.

*Аналіз останніх досліджень.* Забезпечення надійного та безперервного електропостачання є критично важливим для функціонування сучасного суспільства та розвитку економіки [3]. Це особливо актуально у випадках, коли електроенергія є основним джерелом енергії, а також коли виникають аварійні ситуації. Однією з ключових задач є точне визначення місця пошкодження на повітряних лініях електропередачі напругою 0,38 кВ. Це важливо для забезпечення надійності енергопостачання та оперативного відновлення роботи системи. Для вирішення цієї задачі використовуються різноманітні математичні методи, що базуються на фізичних принципах та вимагають наявності відповідних баз даних [4].

Таким чином, прилади розроблені на основі цих методів, відрізняються за рівнем похибки, яка значно впливає на точність визначення відстані до місця несправності під час обслуговування ліній електропередач [5]. Методи функціонального локалізування, що ґрунтуються на оцінці параметрів аварійного стану, часто використовують так звані методи "відстані до несправності" [6]. Зазвичай вони реалізовані у цифрових терміналах реле захисту ліній електропередач або в автономних локаторах пошкоджень. Помилки цих методів можуть бути односторонніми, двосторонніми або багатосторонніми і можуть мати різні причини. Тому, більшість недоліків цих приладів та методик визначення місця пошкодження кабелю 0,38 кВ, що виникають через вибір самого алгоритму функціонального локалізування його особливості та використані формули для обчислень [7].

Аналіз методів функціонального локалізування повітряних ліній 0,38 кВ включає наступні етапи:

- встановлення параметрів для калібрування локатора несправностей повітряних ліній 0,38 кВ з урахуванням його характеристик та конфігурації [8];
- обчислення параметрів струмів і напруг в передбачуваних місцях установки локатора кабелю при несправностях у різних точках повітряних ліній 0,38 кВ [9];
- використання вибраного алгоритму повітряних ліній 0,38 кВ та відповідних виразів для ідентифікації можливих місць несправностей [10];



– визначення похибки розрахунку відстані до місця пошкодження повітряних ліній 0,38 кВ відповідно до обраного алгоритму.

Нормативно-технічні документи у галузі електроенергетики встановлюють наступні вимоги до визначення зони огляду повітряних ліній 0,38 кВ:

–  $\pm 15\%$  від довжини повітряних ліній 0,38 кВ, якщо її протяжність до 5 км [11];

–  $\pm 10\%$  від довжини повітряних ліній 0,38 кВ, якщо її довжина становить від 5 до 10 км [12].

Таким чином, інспекційна зона повітряних ліній 0,38 кВ не повинна перевищувати встановлені значення, оскільки це може вплинути на точність діагностики. Техніки, які використовують автоматичне повторне вмикання після аварійного відключення повітряних ліній 0,38 кВ з несправністю, повинні проводити перевірку мінімально можливого перерізу кабелю з урахуванням точності використаних алгоритмів повітряних ліній 0,38 кВ.

Однією з важливих особливостей експлуатованих повітряних ліній 0,38 кВ є нерівномірність питомого опору вздовж них, що пояснюється наступним:

– використання різних видів опор на різних ділянках ліній електропередачі обумовлене, наприклад, змінами в рельєфі маршруту [13];

– зміни опору заземлення на різних ділянках ліній передачі електроенергії виникають через маршрут проведення лінії, яка прокладена через ділянки з різними ґрунтами: кам'янистими, болотами, річковими ділянками, водосховищами тощо [14];

– відсутність повітряного заземлення на окремих ділянках повітряних ліній 0,38 кВ (в окремих випадках, за конструктивним рішенням заземлювач використовується тільки на під'їздах до підстанцій в регіони з низькою грозовою активністю) [15];

– різна довжина прольотів повітряних ліній 0,38 кВ [16, 17];

– різні типи та перерізи кабелів на різних ділянках повітряних ліній 0,38 кВ [1, 16, 17].

Неврахування вищезазначених факторів може призвести до значних похибок у визначенні відстані до місця пошкодження ліній електропередач.

Отже, у сучасній практиці широко використовуються інструменти моделювання для оцінки помилок алгоритмів визначення місця пошкодження ліній та їх ритмів експлуатації. Результати моделювання дозволяють врахувати різноманітні фактори, що впливають на точність визначення місця пошкодження, такі як нерівномірність параметрів ліній електропередачі. Застосування



статистичних методів може обґрунтувати доцільність використання таких методик для оцінки похибок визначення місця пошкодження. У випадку відсутності можливості провести моделювання, аналітичні методи можуть бути використані для оцінки похибок. Таким чином, аналіз існуючих методик аналітичного оцінювання помилок і спрощення визначення місця пошкодження ліній електропередачі 0,38 кВ та розробка нових методик залишається актуальною задачею сьогодення для вітчизняних та закордонних вчених.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою дослідження – підвищення точності визначення місця пошкодження кабелю в повітряних лініях 0,38 кВ, що забезпечить зменшення втрат електроенергії для систем електропостачання.

Тому відповідно до поставленої мети сформульовано наступні завдання дослідження:

1. Необхідно провести критичний аналіз методик точності визначення місця пошкодження кабелю в повітряних лініях 0,38 кВ.

2. Здійснити критичне дослідження того, як втрати електроенергії впливають на точності визначення місця пошкодження в повітряних лініях 0,38 кВ.

3. Здійснити удосконалення можливості та майбутні напрямки для ефективності у напрямку сталого управління точності визначення місця пошкодження в повітряних лініях 0,38 кВ.

*Основна частина.*

### **1. Обґрунтування методів і засобів пошуку пошкодження в розподільних мережах з повітряними лініями електропередачі 0,38 кВ**

Під час обґрунтування швидкого виявлення та визначення місця обриву кабелю в ліній електропередач (ЛЕП) 0,38 кВ, крім захисту лінії, необхідно розробити пристрій для визначення місця пошкодження, що базується на локаційному методі. При електричному обриві ЛЕП 0,38 кВ на землю, механічного обриву жодної жили, як правило, не відбувається. В цьому випадку віддаль до точки замикання встановлюється за величиною опору ділянки провідника. Проте, внаслідок великої довжини та ненадійного контакту із землею пряме вимірювання омметром неможливе.

На практиці його виконують опосередковано – за мостовою схемою порівняння. В ній невідомий опір до точки пошкодження  $r_x$  розраховується за результатами порівняння з іншими відомими опорами.

Електричний міст (рис. 1) називається зрівноваженим, якщо струм гальванометра рівний нулю. Умовою рівноваги є рівність потенціалів на клеммах  $a$  і  $b$  вимірювальної діагоналі.

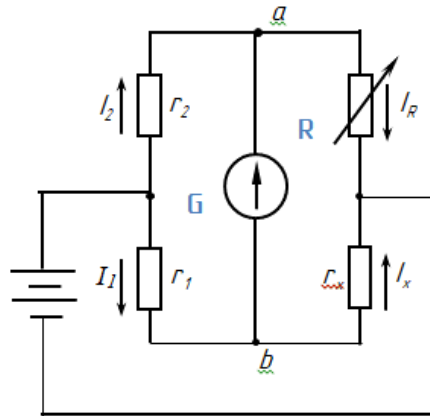


Рис. 1. Принципова схема електричного моста

Вона виконується при довільній напрузі живлення, якщо дотримані наступні співвідношення:

$$\begin{cases} I_1 r_1 = I_2 r_2 \\ I_x r_x = I_R R \\ I_2 = I_R; I_1 = I_x \end{cases} \quad ; \text{ звідки: } \frac{r_1}{r_x} = \frac{r_2}{R}, \text{ або } r_x = \frac{r_1}{r_2} R = nR. \quad (1)$$

В електричному мості зразкові опори  $r_1$  і  $r_2$  утворюють так зване плече відношення:  $r_1/r_2 = n$ , де  $n$  – множник відношення. Абсолютні значення цих опорів впливають лише на споживану схемою потужність. А тому в більшості вимірювальних електричних мостів вказується лише відповідний множник плеча відношення  $n$ .

Друге плече – плече порівняння – утворюється невідомим опором  $r_x$  та змінним опором  $R$ . Найчастіше  $R$  виконується у вигляді 4-х наборів котушок зразкових опорів по десять у кожному (декад). Декадними перемикачами встановлюється необхідний опір порівняння в межах від 0 до 999,99 кроком 0,1 Ом.

Мостові схеми складаються за кількома типовими варіантами, відповідно до специфіки вимірюваного опору. Вимірювання параметрів кабельних ЛЕП виконують за допомогою кабельних мостів. Їх конструкцією передбачено можливість швидкого перекомутування вимірних схем простим трипозиційним перемикачем.

## 2. Міст постійного струму Р-333 приладу РЕЙС-105Р

Схема розміщення органів керування приладом приведена на рис. 2. Цифрами 1,2,3,4 позначено вхідні вимірні клеми. При великих опорах  $r_x > 10$  Ом клеми 1 і 2 та 3 і 4 попарно закорочуються і спад напруги на опорі  $r_x$  знімається з тих самих затискачів, через які подається вимірювальний струм.

Якщо  $r_x < 10$  Ом, то опір струмових контактів істотно впливає на результат вимірювання. В цьому випадку перемикачка між клемми 1 і 2

знімається, чим одночасно розривається і контакт між клемми 3 і 4. Тоді вимірювання проводиться за так звану чотири клемну схемою: вимірювальний струм подається на опір  $r_x$  через клемми 1 і 4, а спад напруги на ньому знімається з клем 2 і 3. Трипозиційним перемикачем П перекомутується внутрішнє вимірне коло приладу на одну із стандартних схем вимірювання опору: “Петля Варлея”, “Петля Муррея” та схему вимірювання асиметрії двопровідної лінії. Кнопками 5, 6, 7 у вимірне коло вмикається гальванометр  $G$  та подається напруга від батареї живлення  $B$ .

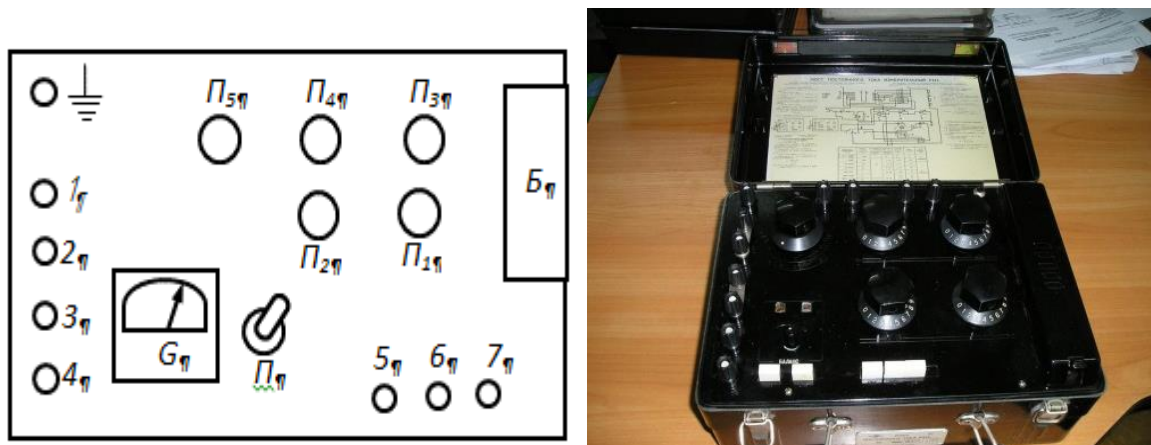


Рис. 2. Розміщення органів керування моста Р 333

Декадними перемикачами  $\Pi_1 \dots \Pi_4$  встановлюється опір  $R$  плеча порівняння, а перемикачем  $\Pi_5$  комутуються опори плеча відношення. Проти білої крапки на  $\Pi_5$  зчитується значення зменшувального множника  $n$ , а проти червоної – збільшувального множника  $M$ . Через клему з позначкою “ $\perp$ ” мостова схема з’єднується з контуром заземлення.

При вимірюваннях необхідно дотримуватись певної послідовності операцій. Спочатку, відповідно до параметрів лінії, перемикачем  $\Pi$  комутується вимірне коло за однією із рекомендованих схем, а потім виставляється рекомендована позиція плеча відношення. Для кабельних силових ліній найчастіше вибирається  $n=0,01$ ,  $M=1000$ , а значення опору  $R$  виставляється близьким до очікуваного.

Подача живлення на вимірну схему і зрівноваження моста виконується методом послідовних наближень. Кнопкою 7 – “Вкл  $G$ ” розблоковується закорочений вхід гальванометра  $G$  та одночасно шпунтується з метою захисту від можливого зашкалювання при невдало вибраних початкових значеннях  $R$ ,  $n$  або  $M$ .







У вирази для обчислення опору до місця пошкодження входить сумарний опір двох лінійних провідників, наприклад  $R_0 + R_1 = R_{01}$ . Його легко виміряти, як звичайним омметром, так і кабельним мостом, якщо протилежні кінці провідників (кабельних жил) закоротити, а початки подати на вхід вимірювального приладу. Оскільки опір є адитивною величиною то абсолютна і відносна похибки для суми обчислюється аналогічно співвідношенню (2):

$$\delta(R_{01}) = \frac{\Delta(R_0 + R_1)}{R_0 + R_1} \leq 0,005, \text{ або } \Delta R_{01} \leq \delta(R_{01}) R_{01} = 0,005 R_{01}. \quad (3)$$

### 3. Сукупний метод вимірювання опору ліній електропередач 0,38 кВ

Опір провідників три провідної лінії  $R_0$ ,  $R_1$  та  $R_2$  вимірюється опосередковано. Метод полягає у проведенні трьох вимірювань трьох попарно з'єднаних провідників. За їх результатами складається система трьох рівнянь з трьома невідомими:

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = R_{12} & R_1 = \frac{1}{2}(R_{12} + R_{10} - R_{20}) \\ R_1 + R_0 = R_{10} & \text{звідки: } R_2 = R_{12} - R_1 \\ R_2 + R_0 = R_{20} & R_0 = R_{10} - R_1 \end{cases} \quad (4)$$

Абсолютна похибка такого вимірювання рівна сумі похибок вимірювання складових виразу і обчислюється за формулою:

$$\Delta R = \frac{1}{2}(0,005 R_{12} + 0,005 R_{10} + 0,005 R_{20}) = 0,075 R_1. \quad (5)$$

### 4. Вимірювальна схема “Петля Варлея” (ПВ)

Еквівалентна схема моста Р 333 для петлі Варлея, приведена на рис. 4, реалізується переведенням перемикача у позицію “ПВ”. За цією схемою невідомий опір  $r_x$  до точки пошкодження вимірюється опосередковано, порівнянням із сумою кількох опорів: ділянки після пошкодження  $r_y$ , повного опору непошкодженої жили  $R_1$  та змінного опору моста  $R$ . Точка  $S$  – точка з'єднання протилежних кінців пошкодженої  $R_0$  та допоміжної  $R_1$  кабельних жил; 2 і 3 – вхідні клеми моста.

Відповідно до властивостей електричного моста (1), його рівновага у випадку петлі Варлея встановлюється за наступного співвідношення:

$$\frac{r_2}{R + R_1 + r_y} = \frac{r_1}{r_x} \text{ або } r_x = \frac{r_1}{r_2}(R + R_1 + r_y). \quad (6)$$

Приймаючи до уваги, що  $r_1 / r_2 = n$  та  $r_x + r_y = R_0$ ,  $r_x \equiv r_{ПВ}$  робоча формула для розрахунку опору до точки пошкодження набуде вигляду:

$$r_x = \frac{n}{n+1}(R + R_0 + R_1). \quad (7)$$

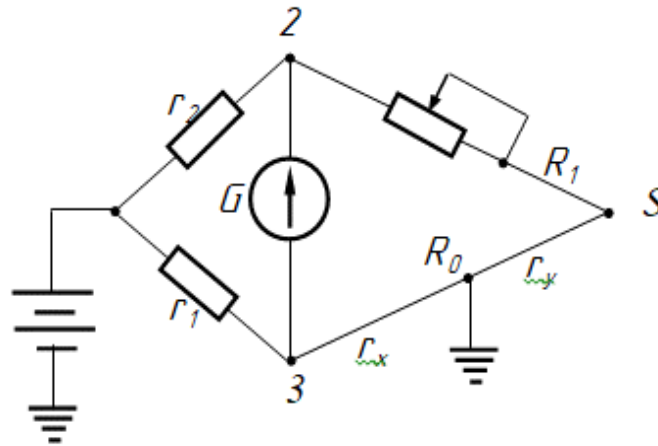


Рис. 4. Вимірна схема “Петля Варлея”

У цю формулу входить сумарний опір двох жил  $R_0 + R_1$ , значення якого попередньо виміряно з похибкою, обчисленою за співвідношенням (3). Цією похибкою можна знехтувати, якщо вимірювання проводити при малих значеннях коефіцієнта плеча відношення:  $n=0,01, 0,001$ . Відтак абсолютну похибку обчислюють за відомим співвідношенням:

$$\Delta r_x = 0,005 r_x. \quad (8)$$

Надійність визначення віддалі до точки пошкодження контролюється додатковим вимірюванням опору  $r_y$ . Для цього слід з'єднати початки двох жил, наприклад  $R_1$  і  $R_0$ , а протилежні – подати на вхідні клеми моста. Невідомий опір  $r_y$  також обчислюється за формулою (7), в якому буде інше значення змінного опору  $R$ . Критерієм надійності є рівень експериментальних значень:

$$r_x + r_y = R_0. \quad (9)$$

Розходження не повинні перевищувати суми похибок  $\Delta r_x + \Delta r_y$ .

### 5. Вимірювальна схема “Петля Муррея” (ПМ)

Еквівалентна схема моста РЗЗЗ для петлі Муррея, приведена на рис. 5, реалізується трипозиційним перемикачем в позиції ПМ. За цією схемою невідомий опір  $r_x$  вимірюється опосередковано, порівнянням із сумою двох опорів: ділянки  $r_y$  після пошкодження та повного опору  $R_1$  допоміжної жили.

Плече відношення цієї схеми складає змінний опір  $R$  та один з опорів набору  $r_1=1,10,100, 1000$  Ом, значення якого вибирається перемикачем  $\Pi_5$  та позначається символом  $M \equiv r_1$ .

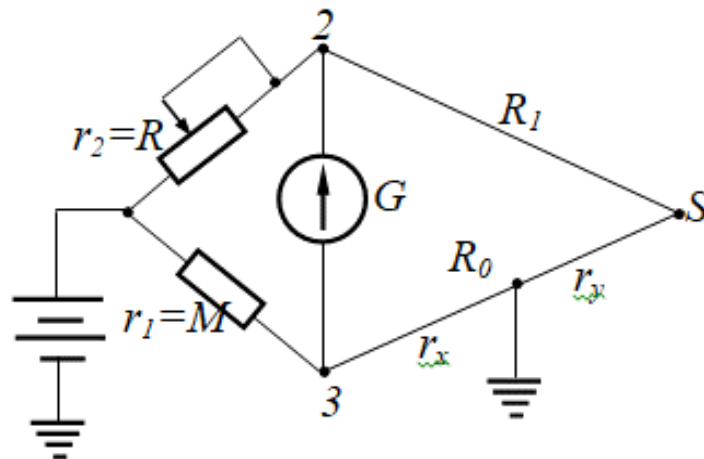


Рис. 5. Вимірювальна схема “Петля Муррея”

Відповідно до умови рівноваги електричного моста (1) рівновага за схемою ПМ наступає при виконанні наступної умови:

$$\frac{R}{r_1} = \frac{r_y + R_1}{r_x} = \frac{R_0 - r_x + R_1}{r_x}. \quad (10)$$

З врахуванням тотожності позначень  $r_1 \equiv M$ , а також очевидної рівності  $r_y = R_0 - r_x$ , вираз для розрахунку  $r_x = r_{\text{ПМ}}$  приймає вигляд:

$$r_x = \frac{M(R_0 + R_1)}{M + R}. \quad (11)$$

Якщо вимірювання виконувати при великих значеннях  $M=100, 1000$ , то  $\Delta R \ll M$  і абсолютну похибку вимірювання можна оцінити за наближеною формулою:

$$\Delta r_x = 0,005 r_x. \quad (12)$$

Надійність вимірювання підтверджується додатковим вимірюванням опору ділянки після пошкодження  $r_y$  та виконанням рівності типу (9).

### 6. Розрахунок віддалі до місця пошкодження лінії електропередач 0,38 кВ

За відомим значенням довжини кабелю  $L$ , повним опором пошкодженої жили  $R_0$  та вимірним значенням  $r_x$  складається пропорція:

$$\frac{L}{R_0} = \frac{L_x}{r_x}, \text{ звідки } L_x = L \frac{r_x}{R_0} \quad (13)$$

Якщо довжина кабелю невідома, то її обчислюють за відомими значеннями перетину і питомого опору матеріалу. В будь-якому випадку загальна довжина кабелю встановлюється з певною похибкою  $\Delta L$ .



Похибку опосередкованого вимірювання віддалі до пошкодження за формулою (13) обчислюють, як максимальну систематичну, шляхом логарифмування, диференціювання та наступної заміни диференціалів приростами:

$$\begin{aligned} \ln L_x &= \ln L + \ln r_x - \ln R_0; \\ \frac{dL_x}{L_x} &= \frac{dL}{L} + \frac{dr_x}{r_x} - \frac{dR_0}{R_0}; \\ \delta(L_x) &\cong \frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta r_x}{r_x} + \frac{\Delta R_0}{R_0}. \end{aligned} \quad (14)$$

Підставивши експериментальні значення всіх величин, отримують чисельне значення максимальної відносної похибки  $\delta(L_x)$  відтак абсолютна похибка визначення віддалі буде:

$$\Delta L_x = \delta(L_x) \cdot L_x. \quad (15)$$

Дослідження проводиться 3-х провідній на моделі з виведеними на зовнішню панель клемами початків і кінців провідників, позначених, як опори  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  та  $R_3$ . В жилах  $R_0$  та  $R_3$  імітовано електричний пробій ізоляції на землю. Точки замикання виведені на клему “+” через перемикач. Еквівалентна довжина лінії становить  $L=930\pm 5$  м.

Робота виконується у декілька етапів, кожен з яких є самостійним завданням. З метою спрощення розрахунків всі вимірювання виконуються при однакових значеннях множників плеча порівняння  $n=0,001$  та  $M=1000$ . Розраховані значення опорів  $r_x$ ,  $r_y$  та їх похибки заносяться у відповідні таблиці.

**Завдання 1.** Освоєння мостового методу вимірювання.

1.1. Ознайомитись з принциповою схемою та конструкцією моста P333.

1.2. З’ясувати призначення клем, органів управління та зміст відповідних умовних позначень принципової схеми.

1.3. Виконати пробні вимірювання зразкових опорів. Для цього під’єднати до вимірних клем 2 і 3 магазин опорів, а перемикач схеми перевести у позицію “МВ”.

1.4. Процес зрівноваження моста слід виконувати в такому порядку:

– вибрати множник  $n$  плеча відношення перемикачем  $\Pi_5$  та встановити очікуване значення опору  $R$  перемикачами  $\Pi_1 \dots \Pi_4$ ;

– натиснути і зафіксувати кнопку “Вкл. Г” і декадними перемикачами змінювати опір  $R$  до встановлення стрілки гальванометра на “нуль”;

– натиснути і зафіксувати кнопку “Грубо” і знову встановити стрілку на “нуль”;



– натиснути і зафіксувати кнопку “Точно” і зрівноважити міст остаточно;

– після зрівноваження всі три кнопки слід відпустити.

1.5. Зняти покази перемикачів змінного опору, обчислити опір за формулою (1) та спів ставити його з показом зразкового магазину опорів.

1.6. Повторити пробні вимірювання інших значень зразкового опору при різних значеннях множників  $n$  та  $M$  для закріплення навичок вимірювання.

**Завдання 2.** Виміряти сумарний опір двох жил.

2.1. Перемикач схеми залишити у позиції “МВ”.

2.2. За коротити кінці двох вибраних кабельних жил (наприклад, опорів  $R_0$  і  $R_1$ ), а їх початки подати на вимірні клемами 2 і 3 (рис. 2).

2.3. Перемикачем плеча відношення  $\Pi_5$  встановити множник  $n=0,01$ , а перемикачами  $\Pi_1 \dots \Pi_4$  змінний опір  $R = 4000$  Ом.

2.4. Зрівноважити міст згідно з п.1.4, зняти покази  $R$ , обчислити сумарний опір  $r_x = R_0$  за формулою (1) і похибку  $\Delta R_{01} = \Delta r_x$  за формулою (2). Результати записати у табл. 1 (див. рис. 8).

*Таблиця 1*

Технічні показники засобів пошуку пошкодження  
в розподільних мережах з повітряними лініями  
електропередачі ЛЕП 0,38 кВ

Пара жил	Сумарний опір									
	$n$	$R$	$R_{ij}$	$\Delta R_{ij}$	$R_0$	$\Delta R_0$	$R_1$	$\Delta R_1$	$R_2$	$\Delta R_2$
01										
02										
12										

2.5. Виконати аналогічні вимірювання та обчислення для інших двох пар кабельних жил  $R_{02}$  та  $R_{12}$ ,  $\Delta R_{02}$  та  $\Delta R_{12}$ . Результати записати у табл. 1.

**Завдання 3.** Вимірювання опору до місця пошкодження за схемою ПВ.

3.1. Перемикач схеми встановити у позицію ПВ.

3.2. Зібрати вимірну схему згідно з рис. 6.

3.3. Встановити множник плеча відношення  $n=0,01$ , а опір плеча порівняння  $R = 1000$  Ом.

3.4. Зрівноважити міст за методикою п. 4.

3.5. Покази  $R$  і  $n$  записати у табл. 2.

3.6. Розрахувати опір  $r_{ПВ}$  ділянки  $r_x$ , похибку  $\Delta r_x$  за формулами (7) і (8) і результати записати у табл. 2.

3.7. Перекомутувати кінці кабельних жил для вимірювання ділянки після пошкодження  $r_y$ .

3.8. Виконати вимірювання  $r_y$  за методикою п.п. 4.

3.9. Перевірити виконання умови (9). Якщо розбіжність перевищує сумарну абсолютну похибку  $\Delta r_x + \Delta r_y$ , виконати повторні вимірювання, зміцнивши з'єднувальні контакти.

**Завдання 4.** Вимірювання опору до місця пошкодження за схемою ПМ.

4.1. Перемикач схеми встановити у позицію ПМ.

4.2. Зібрати вимірну схему згідно з рис. 4.

4.3. Встановити множник плеча відношення  $M=100$  або  $M=1000$ , опір плеча порівняння  $R=1000$  Ом.

4.4. Виконати вимірювання та розрахунки аналогічно до п.п. 4 схеми ПВ. Результати занести у табл. 2 або див. рис. 9

**Завдання 5.** Розрахунок віддалі до місця пошкодження та аналіз результатів.

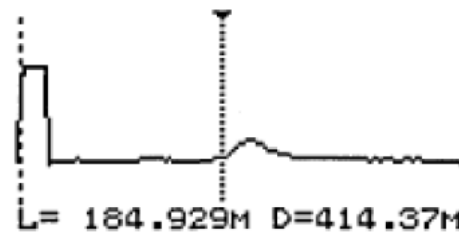
5.1. Розрахувати  $L_x$  за формулою (13) та  $\Delta L_x$  за формулою (15), використовуючи результати обох методів вимірювання.

Таблиця 2

Технічні показники метод визначення віддалі до місця пошкодження ЛЕП 0,38 кВ

Пара, ділянка	ПВ						ПМ					
	n	R	$r_x$	$\Delta r_x$	$L_x$	$\Delta L_x$	n	R	$r_x (r_y)$	$\Delta r_x / r_y$	$L_x$	$\Delta L_x$
01 $r_x$												
01 $r_y$												

Укорочение Настройки  
 Диапазон Память  
 Зонд Режим  
 Растяжка Компьютер  
 Курсоры Калибровка  
 Усиление Информация  
 Смещение Параметры  
 Усреднение Выключение



а

б

Рис. 6. Меню приладу РЕЙС-105Р на основі Arduino MEGA2560 R3 CH340:

а – меню приладу; б – зображення на дисплеї приладу при зондуванні лінії

5.2. Співставити результати розрахунку  $L$  обох методів вимірювання та зробити висновки про доцільніший метод визначення віддалі до місця пошкодження, досліджуваної кабельної ЛЕП 0,38 кВ (рис. 7).

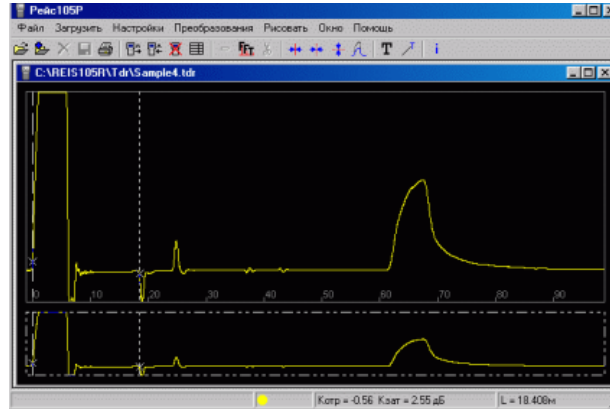


Рис. 7. Зображення вікна монітора при роботі з програмою РЕЙД-105 Р на основі Arduino MEGA2560 R3 CH340

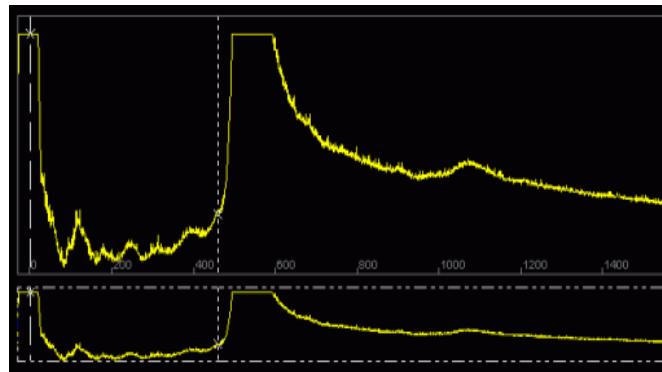


Рис. 8. Зображення рефлектограми до застосування перетворення Фур'є

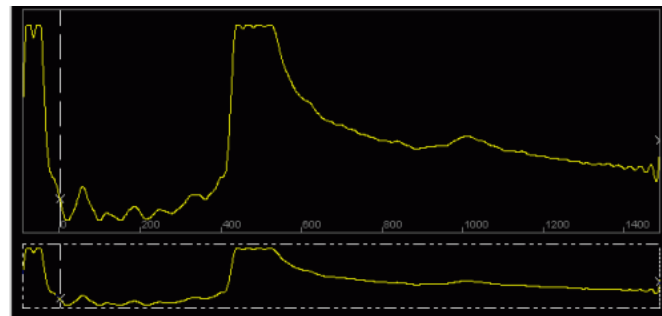


Рис. 9. Зображення рефлектограми після застосування перетворення

Основними проблемами повітряних ліній ЛЕП 0,38 кВ рефлектограми на рис. 8 та 9 є посереднє навчання персоналу користуватися даною методикою та обладнанням. Тому, що проблеми коректного моделювання та проектування надійності систем електропостачання недостатнє врахування природно-кліматичних умов; ці проблеми є і залишатимуться актуальними і вони потребують подальших досліджень.

Метою даного дослідження було ідентифікувати та висвітлити проблеми, що стосуються підвищення надійності електропостачання



на поточному етапі, а також запропонувати шляхи їх вирішення у промисловому виробництві. Дослідження успішно виконало всі поставлені завдання, зокрема ідентифікувало проблеми експлуатації повітряних ліній електропередачі напругою 0,38 кВ та провело їх більш детальний аналіз. Крім того, для досягнення більшої ефективності були знайдені та запропоновані методи вирішення цих питань.

Принцип, який був розглянутий у дослідженні для створення моделі надійності, що враховує вплив зовнішнього середовища та можливі припущення, дозволяє отримати комплексну та більш точну оцінку надійності систем електропостачання, що діють під впливом різних факторів. Показники надійності повинні бути розраховані з урахуванням специфіки експлуатації конкретних систем електропостачання. Отримана математична модель для прогнозування може бути використана для оптимізації розкладів технічного обслуговування, ремонту та профілактики систем. У роботі також проаналізовано сучасні підходи до вирішення проблем забезпечення безпечного та стабільного електропостачання, щоб відповідати сучасним потребам споживачів електроенергії. Майбутні дослідження будуть спрямовані на виявлення проблем та перспектив розвитку впровадження нових технологій для навчання персоналу з метою поліпшення обслуговування складових системи електропостачання промисловості [18-20].

*Висновки.* Точність розрахунку відстані до місця пошкодження за аварійним методом вимірювання схеми “Петля Муррея” та “Петля Варлея” для ліній електропередач напругою 0,38 кВ залежить від різних факторів, включаючи статистику похибок вимірювальних мостів опору, струмів і напруги, особливості обробки цифрових сигналів, уточнення параметрів, які можуть впливати на точність вимірювань області до місця пошкодження з більшою точністю, що необхідно для скорочення часу виконання аварійно-відновлювальних робіт, з метою забезпечення енергетичної безпеки системи та надійність електропостачання споживачів.

Математичні вирази (1, 2, 9, 13 та 15), які були запропоновані, мають велике практичне застосування, оскільки можна використовувати їх для визначення місця пошкодження кабелю ліній електропередач 0,38 кВ під час проведення односторонніх, двосторонніх та багатосторонніх вимірювань опорів для уточнення параметрів, які можуть впливати на точність вимірювань області до місця пошкодження ліній електропередач напругою 0,38 кВ з більшою точністю.

Здійснено дослідження аналітичного методу для визначення місця пошкодження у мережах напругою 0,38 кВ на основі рівнянь





логарифмування ступеня перетину і питомого опору матеріалу з певною похибкою  $\Delta L$ . Під час дослідження було Застосовано дистанційний підхід з подвійним одностороннім вимірюванням параметрів аварійного режиму, таких як поперечного перетину і питомого опору матеріалу на початку та кінці лінії. У разі виявлення помилок у визначенні місця пошкодження, їх теоретично розрахована відсоткова частка становить лише 1%, як для металевих, так і для парних запірок через контактний опір. Фактичні похибки будуть залежати від точності класу моста Р – 333, наприклад: 0,2 - 0,5 - 2,0 - 5,0. У розглянутому випадку допускається похибка  $\pm 5\%$ .

*Список використаних джерел*

1. Ghadi M., Rajabi A., Ghavidel S., Azizivahed A., Li L., Zhang J. From active distribution systems to decentralized microgrids: A review on regulations and planning approaches based on operational factors. *Appl. Energy* 2019, 253, 113543.
2. Schwan M., Ettinger A., Gunaltay S. Probabilistic reliability assessment in distribution network master plan development and in distribution automation implementation. *Proceedings of the CIGRE, 2012 Session, Paris, France, 26–30 August*. 2012. P. 4–203.
3. Alberto Escalera A., Prodanović M., Castronuovo E. D. Analytical methodology for reliability assessment of distribution networks with energy storage in islanded and emergency-tie restoration modes. *J. Electr. Power Energy Syst.* 2019. Vol. 107. P. 735–744.
4. Lebedev V., Filatova G., Timofeev A. Increase of accuracy of the fault location methods for overhead electrical power lines. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. e3098107.
5. Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E. *Fault Location on Power Networks*; Springer: London, UK, 2010. P. 437.
6. Schweitzer E. O. A review of impedance-based fault locating experience. *Proceedings of the 14th Annual Iowa–Nebraska System Protection Seminar, Omaha, NE, USA, 16 October*. 1990. P. 1–31.
7. Minullin R. G. Detecting the faults of overhead electric-power lines by the location-probing method. *Russ. Electr. Eng.* 2017. Vol. 88. P. 61–70.
8. CTO56947007-29.240.55.224-2016 Guidelines for Determining the Places of Damage to Overhead Lines with a Voltage of 110 kV and Higher (Date of Introduction: 17.08.2016). PJSC FGC UES.
9. Ilyushin P. V. Emergency and post-emergency control in the formation of micro-grids. *E3S Web Conf.* 2017. Vol. 25. e 02002.
10. Zaporozhets A. O. Studies in Systems, Decision and Control. *Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*.. 2021. Vol. 359. P. 35-53.



11. Senderovich G. A., Zaporozhets A. O., Gryb O. G., Karpaliuk I. T., Shvets S. V., Samoilenko I. A. Experimental studies of the method for determining location of damage of overhead power lines in the operation mode. *Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*. 2021. Vol. 359. P. 55–77.

12. Gu C. [et al.]. Feasibility of the Potential for Wave and Wind Energy Hybrid Farm to Supply Offshore Oil Platform in Gulf of Mexico. 2021. <https://doi.org/10.4043/31124-MS>.

13. Gulkov Y. V., Turyshcheva A. V. 2021. Reducing the influence of lightning overvoltages on the electrical insulation of overhead power lines 6 (10) kV. *News of the Tula State University. Engineering Sciences*. 2021. Vol. 5. P. 452–458.

14. Gunger Y. R., Lavrov Y. A. Experience in the construction and operation of 6-10 kV power transmission lines on steel poles of the ELSI company in the oil and gas complex. *Territory Oil and Gas*. 2008. Vol. 6. P. 178–181.

15. Ivanov D. M. Application of automatic sectioning in order to improve the reliability of power supply to consumers of the overhead distribution network 6 (10) kV. *Age of Science*. 2022. Vol. 30. P. 49–58.

16. Kockel C., Nolting L., Priesmann J. and Praktiknjo A. 2022. Does renewable electricity supply match with energy demand – A spatio-temporal analysis for the German case. *Applied Energy*. 2022. Vol. 308(C). e118226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118226>.

17. Korobka S., Syrotyuk, S., Zhuravel, D., Boltianskyi, B., Boltianska, L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*, 2021, (2). 60-75.

18. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. *Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі: матеріали XI Міжнар. наук. конференції (Львів, 04–06 жовтня 2022 р.)*. Львів: ЛНУП, 2022. С. 16–18.

19. A. Skliar, B. Boltianskyi, N. Boltianska, D. Demyanenko. Research of the cereal materials micronizer for fodder components preparation in animal husbandry. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. 2019. Ch. 2. С. 249–259.

20. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Болтянський Б. В. Обґрунтування техніко-технологічних рішень створення оптимального мікроклімату в птахівницькому приміщенні. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 2(81). С. 32–38.

*Стаття надійшла до редакції 27.02.2024 р.*



S. Korobka<sup>1</sup>, I. Stukalets<sup>1</sup>, M. Babych<sup>1</sup>, S. Syrotyuk<sup>1</sup>, O. Skliar<sup>2</sup>,  
B. Boltianskyi<sup>2</sup>, R. Skliar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lviv National Environmental University

<sup>2</sup>Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

## ENHANCEMENT OF ENERGY SECURITY OF ELECTRICAL SUPPLY OF CONSUMERS OF ELECTRICAL TRANSMISSION LINES OF 0.38 kV USING THE MONITORING SYSTEM OF VIRTUAL MEASURING DEVICES

### *Summary*

The most accurate determination of the location of damage on overhead power lines is important for ensuring energy security, stability of power systems, and reliability of power supply to consumers. There are various mathematical methods used for this, in particular the distance-to-fault methods are based on the estimation of parameters of the emergency state and are widely used in digital protection relay terminals and power line fault locators. The purpose of the article is to analyze the existing methods of ensuring the energy security of power transmission lines with a voltage of 0,38 kV in emergency situations to determine the location of damage on overhead power transmission lines and estimate the error using parameters of the emergency state.

The study successfully fulfilled all the tasks, in particular, it identified the problems of operating overhead power lines with a voltage of 0,38 kV and conducted a more detailed analysis of them.

The principle that was considered in the study to create a reliability model that takes into account the influence of the external environment and possible assumptions allows to obtain a comprehensive and more accurate assessment of the reliability of power supply systems operating under the influence of various factors. Reliability indicators must be calculated taking into account the specifics of operation of specific power supply systems. The resulting mathematical model for forecasting can be used to optimize maintenance schedules, repair and prevention of systems. The work also analyzes modern approaches to solving the problems of ensuring a safe and stable electricity supply in order to meet the modern needs of electricity consumers.

The developed technique of the authors allows taking into account various factors, including errors in measuring currents and voltages in an emergency state, which significantly affect the accuracy of determining the location of a fault in overhead power lines. This approach allows to reduce the time required for disaster recovery work by more accurately determining the location of the damage and the size of the inspection area.

**Keywords:** measurement, DC bridge, "Murray Loop" and "Varley Loop", power line.