

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311.1

В. М. Кутін<sup>1</sup>  
М. В. Кутіна<sup>1</sup>ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ  
ІНДУКТИВНОГО ОПОРУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ  
З ПОВІТРЯНИМИ ЛІНІЯМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ  
НАПРУГОЮ 6–35 кВ<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Запропоновано математичну модель для визначення індуктивного опору мережі з метою підвищення точності визначення відстані до місця пошкодження при застосуванні дистанційних методів.*

**Ключові слова:** визначення місця пошкодження, дистанційні методи, індуктивний опір лінії

## Вступ

Точність методів визначення відстані до місця пошкодження (ВМП), вибору уставок спрацювання дистанційних захистів в ПЛ напругою 6–35 кВ суттєво залежить від точності вхідних даних і параметрів систем [1].

В процесі аналізу режимів роботи систем електропостачання використовують середні питомі значення первинних параметрів ЛЕП, що зумовлено складнощами експериментального визначення їх дійсних значень [1]. Розбіжність між дійсними значеннями та середніми складає більше ніж 20 %, що призводить до похибки в результатах розрахунку, наприклад, в результатах розрахунку відстані до місця пошкодження дистанційним методом [2, 3]. Для розв'язання задач з підвищення точності методів визначення місця пошкодження (ВМП) до 5 % в разі інструментальної похибки до 1 % необхідна висока точність визначення первинних параметрів. В довідковій літературі [4, 5] ці параметри визначені з похибкою в 15...20 %, тому існує необхідність у дослідженні можливих шляхів підвищення точності отримання розрахункових значень реактивного опору або індуктивності ПЛ.

*Мета роботи* — зменшити похибку визначення реактивного опору лінії, як вхідного параметру для розрахунку відстані до місця пошкодження в дистанційних методах.

## Результати дослідження

До параметрів ліній електропередач напругою 6–35 кВ відносять значення питомих активних  $r_p$ , реактивних  $x_p$ , повних  $Z_p$  опорів і відповідних провідностей  $g_p$ ,  $b_p$ ,  $y_p$ . Для практичних розрахунків режимів роботи систем електропостачання з повітряними лініями електропередач, загальна довжина яких не перевищує 300 км, параметри вважають зосередженими.

Для дослідження реактивного опору лінії розглянемо її параметри. Схема заміщення, як правило, складається з конструктивно неоднорідних фазних проводів. Опір окремих ділянок мережі можна визначити як  $R_n = r_p \cdot l_p$ ;  $X_n = x_p \cdot l_p$ ;  $G_n = g_p \cdot l_p$ ;  $B_n = b_p \cdot l_p$ , де  $n$  — номер ділянки;  $R_n$ ,  $X_n$  — відповідно, активний та реактивний опір ділянки;  $G_n$ ,  $B_n$  — відповідно, активна і реактивна провідність ділянки;  $l_p$  — довжина окремої ділянки.

Реактивний опір ПЛ РМ 10 кВ можна записати у такому вигляді

$$X_r = j\omega L = j\omega L_e + j\omega L_i,$$

де  $L_e$  — індуктивність, яка зумовлена зміною магнітного потоку зовні провідника;  $L_i$  — індуктивність, що виникає внаслідок зміни магнітного потоку в провіднику.

Згідно з [6] розрахунок внутрішнього опору, зумовленого індуктивністю  $L_i$ , є складною задачею через значну кількість факторів, які впливають на її визначення. Наприклад, явище поверхневого ефекту в провіднику, наявність великої кількості провідників в проводі однієї фази лінії електропередачі, матеріали провідників, які відрізняються за значенням електропровідності й магнітної проникності у перерізі проводу; неоднорідностями, зумовленими технологічним процесом виготовлення тощо. Тому сумарні похибки від неврахування різних факторів можуть досягати на частоті 50 Гц 5...20 %. Для високих частот похибка збільшується і може становити 200...300 % [7]. На точність розрахунку найбільший вплив має складність врахування структури проводу. Існуюча методика обчислень електромагнітних полів лінії електропередачі зводиться до спрощеної теорії зворотного земляного проводу (ЗЗП), зосередженого струму на глибині  $A_g$  в землі, що моделювала однорідну лінію провід-земля еквівалентною двопровідною лінією з такою відстанню між проводами, щоб її опір дорівнював опору вихідної однопровідної мережі. Ця теорія є досить простою та наочною і за умов відсутності розвинених обчислювальних засобів знайшла широке застосування. Розраховані за нею параметри є усередненими і можуть задовольняти вимоги до розрахунку параметрів нормального і аварійного режимів для налагодження засобів релейного захисту. Проте, розбіжність результатів розрахунку для промислових частот з експериментальними даними складає 15...20 % [4], що, в свою чергу, значно впливає на точність визначення місця пошкодження за параметрами аварійного режиму (ПАР) дистанційними методами (похибки в таких випадках становлять до 50 %). Це значною мірою знижує ефект від автоматизації процесу пошуку.

В загальному випадку, первинні параметри ЛЕП необхідно знаходити на основі розв'язання рівнянь Максвелла для кожного матеріалу, що входить до складу проводу

$$\operatorname{rot} E_i = -\frac{d}{dt}(\mu_i H_i); \operatorname{rot} H_i = \frac{1}{\rho_i}(E_i) + \frac{d}{dt}(\varepsilon_i E_i), \operatorname{div}(\varepsilon_i E_i) = 0; \operatorname{div}(\mu_i H_i) = 0, \quad (1)$$

де  $E$  та  $H$  — вектори напруженості електричного та магнітного полів;  $\varepsilon_i$  та  $\mu_i$  — абсолютна діелектрична та магнітна проникності  $i$ -го середовища;  $\rho_i$  — питомий опір  $i$ -го середовища.

Прийнявши до уваги прийняті припущення і граничні умови на границях розділу середовищ, подальший аналіз проведемо таким чином.

В [4] встановлено, що первинні параметри є характеристиками ближньої зони електромагнітного поля ЛЕП і мають визначатись в моделі нескінченно довгого проводу

$$\bar{E} = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 = j\omega(0, 0, A_z) - \left( \frac{dU}{dx}, \frac{dU}{dy}, 0 \right), \quad (\bar{E}_1, \bar{E}_2) = 0, \quad (2)$$

де  $A_z$  — складова вектор-потенціалу  $A$  по осі  $z$ , направленою вздовж проводу;  $U$  — електричний потенціал проводу.

Для прийнятих припущень  $A_z$  вважається розв'язком рівняння Гельмгольца [4, 7]

$$\nabla \left( \frac{1}{\mu_{env}} \nabla A \right) = -J, \quad (3)$$

де  $\nabla$  — оператор в поперечному перерізі лінії електропередачі;  $J$  — густина повного струму в заданій точці простору, що дорівнює сумі густини стороннього та наведеного струмів (за нехтування струмами зміщення);  $\mu_{env}$  — магнітна проникність середовища.

Густина струму, для прийнятих вище умов, щодо напруженості визначається із виразу

$$\bar{J} = -\sigma \frac{dU}{dz} - j\omega \sigma \bar{A}_z = \bar{J}_{out} + \bar{J}_{wh}, \quad (4)$$

де  $\sigma$  — провідність середовища;  $J_{out}$  — густина стороннього струму, що визначається градієнтом скалярного потенціалу;  $J_{wh}$  — густина струму, який зумовлений зміною в часі магнітного поля.

Як відомо, в квазістаціонарних полях діють кулонівські сили, при цьому  $\operatorname{div} A = 0$ , тому:

$$\nabla \left( \frac{1}{\mu_{env}} \nabla A_z \right) + j\omega \sigma A_z = J_{out}. \quad (5)$$

Для спрощення розв'язку приймаємо, що густина стороннього струму не залежить від координат і є постійною величиною.

Виходячи з цього, повний струм у провіднику визначаємо, як

$$I = \iint_S J ds = J_{out} S - j\omega\sigma \iint_S A_Z ds. \quad (6)$$

Зв'язок повного струму із густиною стороннього струму також можна встановити за допомогою телеграфного рівняння ПЛ:

$$-\frac{dU(p, x)}{dx} = ZI(p, x); \quad \frac{-dU}{dz} = ZI; \quad J_{out} = \sigma ZI, \quad (7)$$

де для традиційного рівняння, що записано першим  $\bar{U} = [\bar{U}_1 \bar{U}_2 \bar{U}_3 \dots \bar{U}_n]^T$  та  $\bar{I} = [\bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{I}_3 \dots \bar{I}_n]^T$  — вектори операторних зображень напруг на провідниках ПЛ та струмів в цих проводах;  $Z(p) = pM + Z^C(p) + Z^G(p)$  — квадратна матриця порядку  $n$  власних та взаємних повздовжніх погонних опорів;  $M$  — квадратна матриця взаємних та власних індуктивностей між  $k$ -м та  $i$ -м проводами  $M_{ki}$ , що зумовлені магнітними потоками, які замикаються у повітрі;  $Z^C(p)$  — діагональна матриця власних потоків, що проникає в ці проводи;  $Z^G(p)$  — квадратна матриця взаємних та власних опорів в ланцюгу  $k$ -го та  $i$ -го проводів, що викликані магнітними потоками, які проникають у землю.

Таким чином, для визначення будь-якого повздовжнього опору ПЛ необхідно задатись значенням  $J_{out}$ , розрахувати розподіл векторного магнітного потенціалу  $A_Z$  в площині поперечного перерізу повітряної лінії та із виразу (6) визначити повний струм провідника  $I$ . Далі визначається відповідний повздовжній опір

$$Z = \frac{J_{out}}{\sigma I}. \quad (8)$$

Індуктивний опір, що вноситься землею у власний опір лінії, має за Карсоном такий вираз (для системи одиниць СІ)

$$x = \omega\mu_a / \pi \int_0^\infty \sqrt{0,5(\sqrt{\lambda^4 + 1} - \lambda^2)} \exp(-2h\beta\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

де  $\lambda$  — змінна інтегрування;  $\beta = \sqrt{\omega\mu_a / \rho}$  — параметр землі;  $h$  — висота підвісу проводів;  $\mu_a$  — абсолютна магнітна проникність (для алюмінієвих проводів  $12,56 \cdot 10^{-7}$  Г/м);  $\rho$  — питомий опір землі.

Магнітна проникність парамагнетиків, до яких відноситься алюміній,  $\mu_{Al} > 1$ , проте відмінність від одиниці надзвичайно мала  $\mu_{Al} - 1 = 2,1 \cdot 10^{-5}$ , тому для розрахунків її можна прийняти як 1. Для типу ґрунту, властивому Подільському регіону,  $\rho = 150$  Ом/км [8]. Висота підвісу проводів для повітряних ліній 10 кВ складає 8,8 м [9].

Для визначення індуктивного опору необхідно провести числове інтегрування в межах від  $(0; (1/\beta))$ , оскільки для  $\lambda > 1/\beta$  підінтегральний вираз співвідношення (9) перетворюється в машинний нуль. Для наведених умов  $x = 2,289$  (Ом/км). На практиці розрахунок поля виконують в прикладних програмах на ПК (наприклад, FEMLAB [10]) або користуються найбільш точними формулами, отриманими на основі аналізу поля для ПЛ (наприклад, [5]).

Для визначення реактивного опору лінії провід—земля (ПЗ) можна скористатись виразом, що враховує структуру лінії електропередачі у разі з'єднання її в розімкнуте коло, а також розподіл струму по перерізу провідника

$$x = x' + x'' \text{ (Ом/км)}, \quad (10)$$

де  $x' = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_{eq}}$  — індуктивний опір лінії ПЗ в припущенні ідеальної провідності землі;

$x^n = \frac{1}{\pi h n \gamma} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{n}{n+1} \right)^m \frac{v'_m{}^2}{b_m}$  — додатковий індуктивний опір, що вноситься в лінію ПЗ неідеально

провідною землею;  $n = \frac{r_0}{\pi h} \left[ a - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{ar_0}{ar_0 + 2\pi h} \right)^m (\lambda_m J_1(\lambda_m))^{-1} \right]$ ;  $a = \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_m J_1(\lambda_m))^{-1}$ ;

$$v'_m = \frac{\lambda_m}{\sqrt{2r_0}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + (\omega \mu \gamma)^2 \left( \frac{r_0}{\lambda_m} \right)^4}}; \quad b_m = \frac{\omega \mu \gamma}{2v'_m} + \frac{2v'_m{}^3}{\omega \mu \gamma},$$

де  $\lambda_m$  — додатні корені функції Бесселя першого роду нульового порядку;  $J_1$  — функція Бесселя першого роду першого порядку;  $r_0$  — радіус кривизни ПЛ;  $r$  — радіус проводу ПЛ.

Знайдені параметри за формулою (10) відрізняються від результатів експериментів лише на 4 %, а від результатів, що наведені в науковій літературі — на 21 % [5], що підтверджує необхідність використання в методах ВМП параметрів ПЛ, отриманих в результаті детального аналізу їх ЕМП. За похибки в 4 % в розрахункових параметрах похибка в розрахунку відстані до місця пошкодження дистанційним методом складає 3...4 %.

### Висновок

Математична модель (10) для визначення індуктивного опору мережі, яка враховує вплив електромагнітних полів, дозволяє підвищити точність визначення відстані до місця пошкодження порівняно з відомими моделями більш ніж на 20 % із застосуванням дистанційних методів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Файбисович В. А. Определение параметров электрических систем: Новые методы экспериментального определения / В. А. Файбисович. — М. : Энергоатомиздат, 1982. — 120с.
2. Луцяк В. В. Дослідження параметрів аварійного режиму при визначенні місця пошкодження в РМ дистанційними методами / Луцяк В. В. // Проблеми і перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств : науково-технічний семінар : тези доп. — Луцьк, 2007. — С. 22—25.
3. Луцяк В. В. Точність вимірювання відстані до місця пошкодження дистанційним методом в розподільних мережах / В. В. Луцяк, В. М. Кутін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського : зб. наук. праць. — 2007. — Вип. 3. — С. 97—99.
4. Макаров В. М. Первичные параметры линий электропередачи : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.07 / В. М. Макаров — 1976. — 22 с.
5. Махарадзе Г. Т. Исследование сопротивлений воздушных линий электропередачи токам различных последовательностей : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» / Г. Т. Махарадзе. — Баку, 1986. 17 с.
6. Марактанов В. А. Индуктивности линий, состоящих из параллельных проводов : уч. пос. / В. А. Марактанов, А. А. Янко-Триницкий. — Свердловск : изд-во УПИ, 1962. — 20 с.
7. Определение первичных продольных параметров воздушных и подземных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля / [М. В. Булатников, К. П. Кадомская, С. Л. Кандаков, Ю. А. Лавров] // Электричество. — 2006. — № 5. — С. 17—24.
8. Электрические системы и сети / [Буслова Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. И., Перхач В. С.]; под. ред. Г. И. Денисенко. — К. : Вища школа : Главное изд-во, 1986. — 584 с.
9. Крюков К. П. Конструкция и механический расчёт линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. — Л. : Энергия, 1970. — 392 с.
10. Hess M. N. Electromagnetic and electrostatic transmission line parameters by digital computer // IEEE Trans. — 1983. — Vol. PAS 82. — P. 282—291.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.01.2014

**Кутін Василь Михайлович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електричних станцій та систем, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту;

**Кутіна Марина Василівна** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: mkytina@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. M. Kutin<sup>1</sup>  
M. V. Kutina<sup>1</sup>

## Calculation Method of Improving Inductive Reactance Power Systems with Air Power Lines 6–35 kV

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*A mathematical model for determination of inductive resistance of network with the purpose of increase of exactness of distance-finding to the site of damage at application of the controlled from distance methods is suggested in the paper.*

**Keywords:** location of damage, distance methods, inductive resistance of line

**Kutin Vasyl M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electrical Plants and Systems, Head of the Chair of Electrical Power Consumption and Power Management;

**Kutina Marina V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electrical Power Consumption and Power Management, e-mail: mkytina@gmail.com

В. М. Кутин<sup>1</sup>  
М. В. Кутина<sup>1</sup>

## Усовершенствование метода расчета индуктивного сопротивления систем электроснабжения с воздушными линиями электропередачи напряжением 6–35 кВ

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Предложена математическая модель для определения индуктивного сопротивления сети с целью повышения точности определения расстояния до места повреждения при применении дистанционных методов.*

**Ключевые слова:** определение места повреждения, дистанционные методы, индуктивное сопротивление линии

**Кутин Василий Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электрических станций и систем, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента;

**Кутина Марина Васильевна** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: mkytina@gmail.com