

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОВОДУ НА РЕЖИМИ РОБОТИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 110 КВ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

²ТОВ «Схід-Електросервіс»

Розглянуто можливість використання вихрострумів методів неруйнівного контролю в електроенергетиці для безконтактного вимірювання поточних параметрів проводів повітряних ліній електропередачі. Проаналізовано із застосуванням амплітудного і фазового методів неруйнівного контролю зміну поточних параметрів проводу АС 240/32 мм², який переважно застосовується для повітряних ліній 110 кВ. Проведені експериментальні дослідження дозволили виявити, що зі збільшенням механічного зусилля на провід й підвищенням його температури зменшується питомою електрична провідність проводу та збільшується його питомий опір і, відповідно, збільшується активний опір проводу. Результати поданих експериментальних вимірювань свідчать, що прикладене механічне зусилля на провід його подовжує, в результаті чого збільшується стріла провисання й можливий обрив проводу, що приводить до ускладнення режиму роботи ліній. Зі збільшенням активного опору проводу за незмінного струмового навантаження зменшується передана по лінії потужність, а її втрати збільшуються, що впливає на пропускну здатність електричної мережі. Для підтвердження цього, використовуючи дані експерименту, проаналізовано пропускну здатність і втрати активної потужності повітряної лінії 110 кВ. Розрахунок відносної похибки підтверджує достовірність отриманих результатів. Проведені дослідження, які базуються на експериментальних визначеннях впливу механічного зусилля й температури на параметри проводу АС 240/32 мм², обґрунтовують доцільність застосування вихрострумів методів неруйнівного контролю, а саме спільне використання амплітудного і фазового методів для безконтактного вимірювання поточних параметрів проводів повітряних ліній електропередачі з метою покращення керування режимами роботи електричних мереж в реальному часі.

Ключові слова: амплітудний метод, електрична провідність, механічне зусилля, неруйнівний контроль, питомий опір, повітряна лінія, температура, провід, фазовий метод.

Вступ

Заходи з організації ефективного транспортування і розподілення електричної енергії відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» є одним з пріоритетних напрямків розвитку електроенергетики країни [1]. Цей напрямок пов'язаний з вирішенням питань підвищення інформативності електропередачі за рахунок контролю поточних параметрів об'єктів для покращення керування їх режимами в реальному часі.

Контроль поточних параметрів повітряних ліній (ПЛ) дозволить керувати величиною потужності, яка передається по лінії, з урахуванням інформації про струмове навантаження й параметри навколишнього середовища. Особливу увагу слід звернути на взаємодію ПЛ з метеопараметрами. Оскільки, серед технічних характеристик ліній нормуються і граничні рівні положення проводів відносно землі, а вплив метеопараметрів (сніг, дощ, мінлива температура повітря, тощо) приводить до механічної та термічної деградації проводу, що сприяє його подовженню та можливому обриву й веде до зростання кількості аварійних випадків в електричних мережах (ЕМ).

Тому, керування режимами роботи ЕМ згідно з реальними даними про механічну і термічну стійкість проводів ПЛ актуальне. Для реалізації цього завдання досить перспективним є використання вихрострумів методів неруйнівного контролю параметрів поздовжніх провідників, до яких відносяться й проводи ПЛ.

Мета статті — проаналізувати із застосуванням вихрострумів методів неруйнівного контролю зміну параметрів проводу АС 240/32 мм² й показати їх вплив на режими роботи ПЛ 110 кВ.

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються *задачі*:

1. Аналіз існуючих вихрострумів методів неруйнівного контролю для встановлення можливості їх застосування в електроенергетиці.
2. Формування на базі амплітудного і фазового методів неруйнівного контролю алгоритму безконтактного вимірювання параметрів проводу АС 240/32 мм².
3. Оцінювання експериментального визначення впливу механічного зусилля і температури на параметри проводу АС 240/32 мм².
4. Обґрунтування доцільності застосування вихрострумів методів неруйнівного контролю для покращення керування режимами роботи ЕМ згідно з реальними даними про механічну і термічну стійкість проводів ПЛ 110 кВ.

Результати досліджень

Вихрострумові методи неруйнівного контролю основані на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з полем вихрових струмів, щільність яких залежить від геометричних і фізичних параметрів контрольованого об'єкта. Особливістю вихрострумів методів є можливість проведення безконтактних вимірювань. Тому ці методи дозволяють отримувати інформацію навіть за високої швидкості пересування об'єкта контролю. Інша особливість методів полягає в тому, що на сигнал перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забрудненість середовища, а також радіоактивне випромінювання. Крім того, не впливає й покриття об'єкта контролю діелектричними матеріалами, такими як фарби, ізоляція, окис тощо. Вихрострумові методи дозволяють успішно вимірювати геометричні властивості об'єкта, які потрібні в подальшому процесі непрямих вимірювань: діаметр циліндричних виробів, товщина стінок труб за одностороннього доступу до об'єкта, товщина шару багатшарових структур, — в широких межах, обумовлених розмірами вимірювальної котушки перетворювача [2]—[4].

Широке використання вихрострумів методів неруйнівного контролю викликано їх багатопараметричним характером, за якого сигнал перетворювача залежить від геометрії і електромагнітних властивостей матеріалу. В основі багатопараметричних методів лежить вимірювання інформативних параметрів сигналів датчика і виявлення функціональних зв'язків їх з електромагнітними і геометричними характеристиками об'єктів. Така постановка завдання вимагає в процесі вимірювання застосування обчислювальної техніки. Варто зазначити, що отримання первинної інформації у вигляді аналогового електричного сигналу дає можливість легко автоматизувати процес контролю із застосуванням засобів обчислювальної цифрової техніки [4].

До багатопараметричних вихрострумів методів відносяться амплітудний, фазовий методи неруйнівного контролю.

Амплітудний метод — це метод, в якому інформативним параметром є амплітуда. Суть методу полягає в тому, що сигнал певної частоти, що знімається з вимірювальної обмотки перетворювача, детектується за амплітудою, а компенсатором фази пригнічується вплив фази [2].

У фазовому методі усувають вплив зміни повітряного зазору між перетворювачем і контрольованим об'єктом. Необхідний напрям вектора амплітуди для усунення впливу фактора, який заважає, здійснюється за допомогою фазообертальних пристроїв [2], [4].

Ці методи доцільно використовувати спільно для прогнозування граничних конструктивних величин: габаритів лінії, контролю стріл провисання проводів, подовження проводів.

Експериментальні дослідження цього напрямку проводилися на лабораторній установці кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») з використанням проводу АС 240/32 мм², який застосовується переважно для ПЛ 110 кВ [5], [6].

У середині перетворювача вздовж поздовжньої осі розташовувався зразок проводу, закріплений на консольній жорсткій балці, і на нього підвішувалися різні мірні грузи. Значення частоти зміни магнітного поля підбиралось таким чином, щоби виконувалась умова оптимального режиму роботи електромагнітного перетворювача, тобто $1 \leq x \leq 3$ по всьому діапазону зміни механічного напруження (σ_m) [6]

$$\sigma_m = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

де P — вага вантажу, підвішеного до зразка; S — площа поперечного перерізу проводу.

Максимальне значення σ_m (1) відповідало 0,25 величини межі пружності матеріалу зразка проводу.

Для визначення впливу механічного зусилля і температури проводу АС 240/32 мм² використано розраховані значення залежностей нормованих амплітуд і фаз першої і третьої гармонік у вигляді графічних залежностей [5], [7]

$$\frac{A_3}{A_1^3} = f(\operatorname{tg}\Phi_1); \quad \operatorname{tg}\Phi_1 = f(x); \quad A_1 \frac{d}{a} = K = f(x).$$

Алгоритм визначення параметрів проводів ПЛ таких [6]:

– за вимірними значенням амплітуд першої і третьої гармоніки і фази першої гармоніки, користуючись графіком $\frac{A_3}{A_1^3} = f(\operatorname{tg}\Phi_1)$ [5], визначається величина відносної магнітної проникності (μ_r);

– користуючись графіком $\operatorname{tg}\Phi_1 = f(x)$ [5], за кривою відповідного значення (μ_r) і вимірюваного значення $\operatorname{tg}\Phi_1$ визначаємо узагальнений параметр x ;

— за отриманими значеннями μ_r та x з графічної залежності $A_1 \frac{d}{a} = K = f(x)$ [5] знаходиться значення K з подальшим обчисленням $a = \frac{A_1 d}{K}$.

— з виразу $\sigma = \frac{x^2}{a^2 \mu_r \mu_0 \omega}$ [7] визначається питома електрична провідність виробу (σ).

Формули для визначення температури в діапазоні її зміни від -20 °С до $+20$ °С (лінійна залежність ρ від t) у разі використання амплітудного і фазового методів мають вигляд [6]

$$t = \left[\frac{x_1^2(K)}{x^2(K)} - 1 \right] \left[\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right] + t_1; \quad (2)$$

$$t = \left[\frac{x_1^2(\Phi)}{x^2(\Phi)} - 1 \right] \left[\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right] + t_1; \quad (3)$$

$$t = \left[\frac{f}{f_1} - 1 \right] \left[\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right] + t_1, \quad (4)$$

де індекс «1» при змінних x і f відповідає нормальній температурі $t_1 = 20$ °С; α — температурний коефіцієнт опору.

Алгоритм спільного визначення магнітних і електричних параметрів проводів дозволяє одночасно визначити поздовжню магнітну проникність і поперечну питому електричну провідність, оскільки вихрові струми протікають в поперечних перерізах зразка у напрямку, перпендикулярному вектору напруженості (H_0) магнітного поля [5], [6].

Цей алгоритм використано з невеликими змінами, які не порушують загальну послідовність, для визначення відповідних характеристик проводу АС 240/32 мм² за іншими ознаками просторових гармонік: амплітуди першої просторової гармоніки і фази першої і третьої просторових гармонік з виробом. Вимірювальні прилади, особливо діапазон вимірювань та клас точності, вибиралися з урахуванням проведеного розрахунку очікуваних значень сигналів перетворювача.

Вимірювання контрольованих параметрів базувалося на спрощенні процесу вимірювання введенням безрозмірної комплексної величини [6]

$$|K| = \frac{E_{\text{ВН}}}{E_0 \cdot \eta}, \quad (5)$$

яка характеризує собою питому нормовану внесену ЕРС і зв'язує вихідні електричні сигнали.

У табл. 1 подані результати вимірювань впливу механічного напруження на провід АС 240/32 мм², за таких умов: $f = 700$ Гц; $I = 0,2$ А; $U_{\Sigma 0} = 16$ мВ.

Таблиця 1

**Результати вимірювань впливу механічного зусилля на провід АС 240/32 мм²,
коли $f = 700$ Гц; $I = 0,2$ А; $U_{\Sigma 0} = 16$ мВ**

Параметри	Одиниці вимірювання	σ_m , МПа					
		0	2,3	4,5	6,8	9,0	11,3
U_{Σ}	мВ	195	228	245	257	264	269
φ	град.	22,5	24,2	24,9	25,4	25,6	26,0
$U_{вн}$	мВ	181	213	231	243	250	255
$\mu_{эф}$	—	36,0	43,3	47,5	50,5	52,2	53,5
σ	10^{-7} См/м	3,76	3,16	3,10	3,06	3,03	2,97
ρ	10^{-8} Ом/м	2,66	3,20	3,22	3,26	3,30	3,36

Як впливає з табл. 1, зі збільшенням механічного напруження (σ_m) на провід зменшується питома електрична провідність проводу (σ) і збільшується його питомий опір (ρ). Ці експериментальні дослідження показують, що прикладене до проводу механічне навантаження призводить не тільки до його видовження, в результаті чого збільшується стріла провисання, а й до можливого обриву проводу. Також варто звернути увагу на те, що механічне зусилля ускладнює режим роботи ПЛ 110 кВ через зміну довжини проводу. В результаті цього змінюються параметри ліній, і насамперед, активний опір, що впливає на втрати активної потужності. Результати вимірювань зміни значень опору від температури проводу АС 240/32 мм² наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Значення зміни опору від температури проводу АС 240/32 мм², коли $f = 700$ Гц; $I = 0,2$ А; $U_{\Sigma 0} = 16$ мВ

Параметри	Одиниці вимірювання	t , °C				
		-20	-10	0	10	20
U_{Σ}	мВ	228	245	195	264	269
φ	град.	24,2	24,9	22,5	25,6	26,0
$R_{вимір}$	10^{-8} Ом/м	2,4	2,55	2,66	2,68	2,79
$R_{вимір}$	10^{-3} Ом/м	99,18	106,76	110,66	111,48	116,06

З табл. 2 випливає, що зі збільшенням температури проводу (t) збільшується його питомий опір (ρ) і, відповідно, збільшується активний опір проводу (R), що відображається на пропускній здатності ПЛ 110 кВ. Для підтвердження цього, використовуючи дані експерименту, проаналізовано пропускну здатність і втрати активної потужності ПЛ 110 кВ, а також розраховано відносну похибку [6]. Результати розрахунку подано в табл. 3.

Таблиця 3

Значення активної потужності ($P_{вимір}$) і технологічних втрат активної потужності ($\Delta P_{вимір}$), а також відносна похибка (δR) за робочого струму $I = 375$ А з урахуванням температури проводу АС 240/32 мм²

Параметри	Одиниці вимірювання	t , °C				
		-20	-10	0	10	20
$R_{вимір}$	10^{-3} Ом/км	99,18	106,76	110,66	111,48	116,06
$P_{вимір}$	МВт	16,31	15,61	15,41	14,91	13,92
$\Delta P_{вимір}$	МВт/км	0,42	0,45	0,46	0,47	0,49
δR	%	1,48	3,72	2,53	1,3	0,84

Як свідчать результати розрахунку (табл. 3), за незмінного струмового навантаження, зі збільшенням активного опору проводу (R) зменшується передана по лінії потужність ($P_{вимір}$), а її втрати ($\Delta P_{вимір}$) збільшуються.

Обговорення отриманих результатів

Із застосуванням амплітудного і фазового методів неруйнівного контролю досліджено зміну параметрів АС 240/32 мм² і виявлено, що зі збільшенням механічного зусилля на провід зменшується питома електрична провідність проводу і збільшується його питомий опір, а в результаті підвищення температури проводу збільшується його питомий опір і, відповідно, збільшується активний опір проводу.

Результати досліджень свідчать, що прикладене механічне зусилля на провід призводить до його

го видовження, в результаті чого збільшується стріла провисання й можливий обрив проводу, що призводить до ускладнення режиму роботи ЕМ й зумовлює доцільність контролювання поточних параметрів ліній, а зі збільшенням активного опору проводу за незмінного струмового навантаження зменшується передана по лінії потужність, а її втрати збільшуються, що впливає на пропускну здатність ЕМ.

Розрахунок відносної похибки ($\delta R \leq 4\%$) підтверджує достовірність отриманих результатів.

Таким чином, описані розрахунки свідчать про те, що контроль поточних параметрів проводу дозволить покращити керування режимами роботи ЕМ в реальному часі за рахунок корегування величини потужності, яка передається по ПЛ згідно з реальними даними про механічну і термічну стійкість проводів.

Висновок

Проведені дослідження, які базуються на експериментальних визначеннях впливу механічного зусилля й температури на параметри проводу АС 240/32 мм², обґрунтовують доцільність застосування вихрострумових методів неруйнівного контролю, а саме спільне використання амплітудного і фазового методів для безконтактного вимірювання параметрів проводів повітряних ліній 110 кВ з метою покращення керування режимами роботи електричних мереж в реальному часі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Верховна Рада України, Закон України «Про ринок електричної енергії України» від 13 квітня 2017 року, № 2019-VIII, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19/page>.
- [2] *Неразрушающий контроль*: в 8 т. *Контроль герметичности. Вихретоковый контроль*, В. В. Ключев, Ред. Москва, РФ: Машиностроение, 2003, т. 2, 688 с.
- [3] Arsalan Habib Khawaja, and Qi Huang, "Monitoring of Overhead Transmission Lines: A Review from the Perspective of Contactless Technologies," *Sensing and Imaging*, vol. 18, pp. 24-18, 2017.
- [4] B. Gorkunov, S. Lvov, Y. Borysenko, and S. Tamer, "Multi-parameter electromagnetic method of testing cylindrical conductors," *The scientific heritage*, vol. 42, pp. 25-28, 2019.
- [5] М. Абрамовиц, и И. Стиган, *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами*, М. Абрамовиц, Ред. Москва: Наука, 1979, 832 с.
- [6] В. О. Бондаренко, Б. М. Горкунов, В. В. Черкашина, І. Б. Горкунова, і А. Г. Серета, «Розробка методики та практики застосування для безконтактного контролю робочого стану проводів повітряних ліній.» *Звіт про виконання НДР № 37479*. Харків, Україна: НТУ «ХПИ», 2014, 65 с.
- [7] B. Gorkunov, S. Lvov, and Y. Borysenko, "Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing," *Системи обробки інформації*, вип. 4 (155), с. 92-97, 2018. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.155.12>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

Черкашина Вероніка Вікторівна — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, e-mail: veronika2473@gmail.com ;

Баглицький Владислав Миколайович — інженер-проектувальник ТОВ «Схід- Електросервіс»; аспірант кафедри передачі електричної енергії, e-mail: vlad95415@outlook.com .

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

V. V. Cherkashyna¹
V. M. Baklytskyi^{1,2}

Scientific Research of the Influence of Wire Parameters on the Operating Modes of 110 kV Overhead Lines

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»;

²LLC «Shid-Electroservice»

The article considers possibility using eddy current methods, non-destructive testing, in the power industry for contactless measurement instant parameters wires overhead power lines. There have been analyzed, with applied amplitude and phase methods of non-destructive testing, the change instant parameters of steel- aluminum wires with cross-section

240/32 mm², which are mostly used for overhead power lines 110 kV. Made experimental research have revealed, that with increasing mechanical stresses on the wire and increasing its temperature decreases the electrical conductivity of the wire and increases its resistivity and, accordingly, increases the active resistance of the wire. The results of the presented experimental measurements show that the applied mechanical force on the wire leads to its elongation, in result it increased sagging and possible breakage of the wire, what complicates the operation mode of the line, and with increasing active resistance of the wire at constant current load, decreases transmitted power, and its losses increase, which affects the capacity of power line. To confirm this, using the experimental data, analyzed the capacity of power line and loss of active power of the 110 kV overhead line. The calculation of the relative error confirms the reliability of the results. The researches, which is based on experimental determinations of the influence of mechanical stresses and temperature on the parameters of the steel-aluminum wire with cross-section 240/32 mm², substantiates the feasibility of using eddy current methods (non-destructive testing), namely the joint use of amplitude and phase methods for contactless measurement of instant parameters overhead power lines wires, for improving operation modes management of electrical networks in real time.

Keywords: amplitude method, electrical conductivity, mechanical force, non-destructive testing, resistivity, overhead line, temperature, wire, phase method.

Cherkashyna Veronika V. — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electric Power Transmission, e-mail: veronika2473@gmail.com ;

Baklytskyi Vladyslav M. — Design-engineer LLC «Shid-Electroservice»; Post-Graduate Student of the Chair of Electric Power, e-mail: vlad95415@outlook.com

В. В. Черкашина¹
В. Н. Баклицкий^{1,2}

Исследование влияния параметров провода на режимы работы воздушных линий 110 кВ

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»;

²ООО «Восток Электросервис», Харьков

Рассмотрена возможность использования вихретоковых методов неразрушающего контроля в электроэнергетике для бесконтактного измерения текущих параметров проводов воздушных линий электропередачи. Проанализировано с применением амплитудного и фазового методов неразрушающего контроля изменение текущих параметров провода АС 240/32 мм², который преимущественно применяется для воздушных линий 110 кВ. Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить, что с увеличением механического усилия на провод и повышением его температуры уменьшается удельная электрическая проводимость провода и увеличивается его удельное сопротивление и, соответственно, увеличивается активное сопротивление провода. Результаты экспериментальных измерений свидетельствуют о том, что приложенное механическое усилие на провод вызывает его удлинение, в результате чего увеличивается стрела провисания и возможен обрыв провода, что приводит к усложнению режима работы линий. С увеличением активного сопротивления провода при неизменной токовой нагрузке уменьшается переданная по линии мощность, а ее потери увеличиваются, что влияет на пропускную способность электрической сети. Для подтверждения этого, используя данные эксперимента, проанализированы пропускная способность и потери активной мощности воздушной линии 110 кВ. Расчет относительной погрешности подтверждает достоверность полученных результатов. Проведенные исследования с экспериментальным определением воздействия механического усилия и температуры на параметры провода АС 240/32 мм² обосновывают целесообразность применения вихретоковых методов неразрушающего контроля, а именно совместное использование амплитудного и фазового методов для бесконтактного измерения текущих параметров проводов воздушных линий электропередачи с целью улучшения управления режимами работы электрических сетей в реальном времени.

Ключевые слова: амплитудный метод, электропроводность, механическое усилие, неразрушающий контроль, удельное сопротивление, воздушная линия, температура, провод, фазовый метод.

Черкашина Вероника Викторовна — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры передачи электрической энергии, e-mail: veronika2473@gmail.com ;

Баклицкий Владислав Николаевич — инженер-проектировщик ООО «Восток Электросервис»; аспирант кафедры передачи электрической энергии, e-mail: vlad95415@outlook.com