УДК 621.315.23 : 004.94 DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.010

СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ

А.А.Щерба*, чл.-кор. НАН України, **О.Д. Подольцев****, докт. техн. наук, **І.М. Кучерява**, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: podol@ied.org.ua

У роботі запропоновано пристрій для дистанційного моніторингу стану високовольтної кабельної лінії. Пристрій дає змогу одночасно вимірювати декілька діагностичних показників: температуру зовнішньої оболонки кабелю, електричний струм у жилі, ємнісний струм на землю. Він використовує спеціально створене внутрішнє електричне джерело живлення, що перетворює безпосередньо енергію електромагнітного поля кабелю в електричну енергію з необхідними параметрами. За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіл температурного поля в активній зоні кабельної лінії напругою 330 кВ та встановлено кількісний зв'язок між температурою зовнішньої оболонки кабелю (яка безпосередньо вимірюється) та значеннями температури жили кабелю та ізоляції, які є важливими діагностичними показниками теплового стану силового кабелю. Бібл. 5, рис. 3.
Ключові слова: кабельна лінія, моніторинг, діагностика стану, температурне поле.

Вступ. У сучасний період кабельні лінії високої та надвисокої напруги використовуються для передачі електричної енергії у великих містах (мегаполісах) з високою компактністю населення. Для підвищення надійності їхньої роботи застосовуються різні технічні засоби, зокрема для безперервного моніторингу температури фазних кабелів, що складають високовольтну кабельну лінію. Знаючи температурний режим кабелів упродовж деякого періоду, можна визначити остаточний ресурс ізоляції та вибрати раціональний режим навантаження кабельної лінії.

Найбільш поширеним нині технічним рішення щодо моніторингу стану кабельних ліній є використання волоконно-оптичної технології [1], коли на етапі виробництва силового кабелю в його конструкцію вбудовується як датчик температури волоконно-оптичний модуль, який дає змогу вимірювати розподіл температури вздовж усього кабелю під час протікання в ньому електричного струму. Треба зазначити, що описана система, хоча і є складною, однак дає змогу вимірювати температуру не в одній певній точці, а визначити розподіл температури вздовж усього кабелю. З іншого боку, така система моніторингу має свої недоліки: 1) може використовуватися лише на кабельних лініях, що містять силові кабелі з інтегрованим на етапі їхнього виготовлення волоконно-оптичним модулем; 2) дає змогу вимірювати розподіл лише температури вздовж кабелю; 3) потребує використання зовнішнього джерела живлення.

Метою цієї роботи є створення пристрою для дистанційного моніторингу стану високовольтної кабельної лінії з розширеними функціональними можливостями: 1) використання та здійснення моніторингу як нових, так і вже наявних кабельних ліній, 2) одночасного вимірювання як температури кабелю, так і інших діагностичних показників (таких як електричний струм у жилі, ємнісний струм на землю тощо); 3) відмовитися від зовнішнього джерела живлення, а використовувати спеціально створене внутрішнє джерело, що перетворює безпосередньо енергію електромагнітного поля кабелю в електричну з необхідними параметрами.

Структура запропонованої системи дистанційного моніторингу стану кабельної лінії. Система дистанційного моніторингу стану кабельної лінії, що пропонується, має силовий кабель з інтегрованими в його конструкцію датчиками для вимірювання, наприклад,

© Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М., 2020
ORCID ID:* https://orcid.org/0000-0002-0200-369X, ** https://orcid.org/0000-0002-9029-9397

температури та струму в жилі кабелю, мікроконтролер для обробки інформації, що надходить із цих датчиків, пристрій для бездротової передачі високочастотним каналом радіозв'язку цієї інформації в диспетчерський пункт та автономне джерело живлення всіх цих елементів, яке має індуктивний зв'язок зі струмом кабелю та перетворює енергію його електромагнітного поля в електричну з необхідними параметрами.

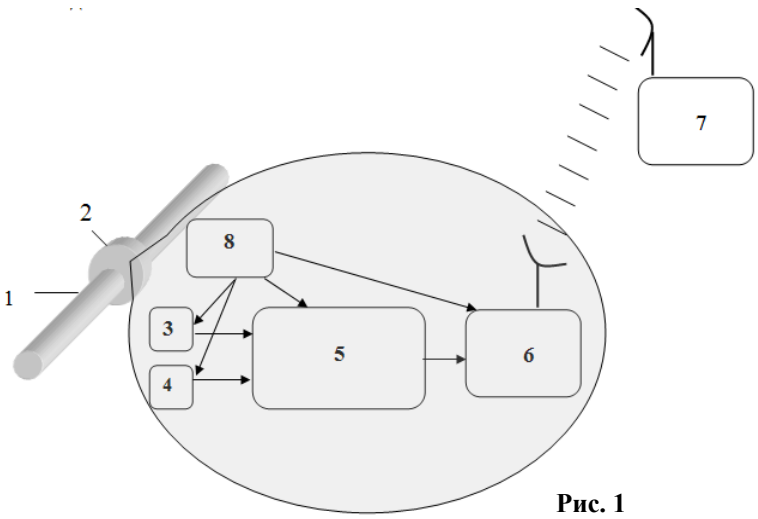

Рис. 1

На рис. 1 схематично показано один фазний кабель *1*, на зовнішній оболонці якого розміщено запропонований пристрій *2* для дистанційного моніторингу стану кабелю. До складу цього пристрою входять датчики для вимірювання діагностичних показників – температури *3* та електричного струму в жилі *4*, мікроконтролер *5* для обробки вимірюваних даних, пристрій *6* для бездротової передачі по високочастотному каналу радіозв'язку цієї інформації в диспетчерський пункт *7* та автономне джерело живлення всіх цих елементів *8*, яке має індуктивний зв'язок із жилами кабелю та перетворює енергію його електромагнітного поля в електричну з необхідними параметрами. Таке джерело побудовано на основі трансформатора струму (з магнітопроводом або без магнітопроводу), первинною обмоткою якого є жила кабелю, а вторинна обмотка підключена до напівпровідникового перетворювача, який виробляє електричну енергію з необхідними параметрами та живить усі елементи пристрою. У загальному випадку джерело *8* може мати акумуляторну батарею, безперервна підзарядка якої здійснюється від цього перетворювача.

Запропонований пристрій працює у такий спосіб. Під час передачі електричної енергії кабельною лінією внаслідок протікання електричного струму промислової частоти (50 Гц) навколо кожного кабелю створюється магнітне поле, енергія якого за допомогою трансформатора струму, що входить до складу джерела *8*, перетворюється в електричну енергію і використовується для живлення всіх елементів пристрою. Із використанням встановлених датчиків вимірюються значення температури на поверхні оболонки кабелю та значення струму в його жилі. Ці дані пересилаються зі встановленою часовою дискретністю на диспетчерський пункт за допомогою радіозв'язку. Таким способом здійснюється дистанційний моніторинг стану кабелю. Пристрій здатен працювати, доки кабелем протікає електричний струм, а в разі встановлення акумуляторної батареї ще деякий додатковий час, що залежить від ємності батареї.

Найдоцільніше запропонований пристрій встановлювати в найбільш небезпечних із погляду експлуатації лінії ділянках кабелю. Крім того, за його допомогою можна вимірювати просторове розподілення діагностичних показників кабельної лінії вздовж усієї її довжини з необхідною роздільною здатністю, яка характеризується просторовим кроком *l*. У цьому випадку такі пристрої необхідно розміщувати на зовнішній оболонці кабелів уздовж усієї їхньої довжини з таким самим просторовим кроком *l*.

У разі спорудження кабельної лінії значної довжини використовуються з'єднувальні муфти. Для моніторингу стану таких муфт також можна використовувати запропонований пристрій. Для цього його необхідно розміщувати на зовнішній поверхні з'єднувальних муфт.

Зазначимо, що найбільш важливою перевагою системи моніторингу, що пропонується, є можливість її встановлення на вже наявних кабельних лініях, що прокладені в ґрунті, тунелях та місцях приєднання до повітряної лінії електропередачі.

Комп'ютерне моделювання для встановлення зв'язку між значеннями температури зовнішньої оболонки та жили кабелю. У запропонованій системі моніторингу вимірюється температура на зовнішній поверхні оболонки кабелю. Водночас для визначення температури жили та ізоляції кабелю на основі відомої температури оболонки необхідно встановити зв'язок між цими температурними значеннями. Для розв'язання цієї задачі в роботі використовується чисельний розрахунок розподілу температурного поля в перерізі силового кабелю лінії 330 кВ.

Математична модель теплового процесу в підземній кабельній лінії [3]. Моделюється процес розподілу температури в неоднорідному середовищі, що включає дволанкову кабельну лінію напругою 330 кВ.

Схему траншейного прокладання кабелів та розрахункову ділянку наведено на рис. 2. Унаслідок наявної симетрії щодо осі *OA* ця ділянка містить одну ланку кабельної лінії. Камера в траншеї з кабелями *1* засипається спеціальним ґрунтовим матеріалом *2* і закривається бетонними плитами *3* упродовж усієї траси, що служить захистом кабелів від механічних пошкоджень. Зверху врівень із поверхнею землі траншея заповнюється природним ґрунтом *4*.

Розподіл температури в ділянці з підземними кабельними лініями в усталеному режимі описується диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$-\nabla\cdot(\lambda\nabla T)=Q,$$

де $\lambda(x,y,T)$ – залежна від просторових координат і в загальному випадку від температури теплопровідність відповідного матеріалу; $Q(x,y)$ – густина потужності, присутня в ділянці теплових джерел, до яких належить джоулеве тепло, що виділяється в масивних провідниках струмопровідних жил кабелів, та діелектричні втрати в ізоляційному матеріалі.

Граничні умови задачі задаються у такий спосіб. На осі симетрії *OA:* $\partial T/\partial n=0$, на поверхні землі: умова теплообміну $-\lambda\partial T/\partial n=k(T-T_n)$ (k – коефіцієнт тепловіддачі в повітря; T_n – температура повітря; **n** – вектор зовнішньої нормалі до границі). З урахуванням обраних розмірів розрахункової ділянки (рис. 2) інші границі вважаються ізотермічними, і задається умова: $T=T_0$, де T_0 – температура навколишнього середовища (ґрунту).

Наведена гранична задача розв'язувалася чисельно методом скінченних елементів з використанням програми Comsol [4]. Покриття розрахункової ділянки кінцевими елементами зображено на рис. 2.

Результати комп'ютерного моделювання. Технічні характеристики досліджуваних кабелів та вихідні дані для розрахунків наведено в роботі [2]. Розміри, що характеризують підземне прокладання кабелів, вказано на рис. 2, де на вставці праворуч показано також розташування кабелів у кабельній лінії.

У розрахунках враховувалися такі елементи багатошарової конструкції кабелю: алюмінієва струмопровідна жила; ізоляційний шар зі зшитого поліетилену; екран із мідних дротів, поверх якого спірально накладена мідна стрічка; герметична зовнішня оболонка, що захищає кабель від можливих механічних пошкоджень і проникнення вологи.

Отримана розрахунковим шляхом характерна картина розподілу температурного поля навколо кабелів у траншеї показана на рис. 3. Тут розподіл температури зображено відтінками кольорів та контурними лініями з кроком 10^0 С, вектори теплового потоку показано стрілками.

Наведена картина теплового поля відповідає температурі ґрунту навколо траншеї T_0 = 15^0 С та його теплопровідності λ = 0,8 Вт/(м·^{0}С). На рис. 3 на вставках праворуч наведено значення температури жил кабелів та графік змінення температури на поверхні землі (верхній графік), а також змінення температури вздовж горизонтальних ліній, що проходять через центральні точки жил кабелів (два нижні графіки). Видно, що найбільше нагрівається жила внутрішнього кабелю, найближче розташованого до осі симетрії та, відповідно, до сусіднього ланцюга кабельної лінії. У разі вибраних даних температура кабелів не перевищує

встановлених норм нагріву елементів – 90^0 С [5]. Ґрунт у траншеї й навколо неї на відстані до 2 м нагрівається до температури не менше 30^0 С.

Результати рис. 3 свідчать, що температура жили дорівнює $T_1 = 88^0$ С, температура ізоляції поблизу екрана $T_2 = 78^0$С, а температура зовнішньої оболонки кабелю, яка вимірюється, $T_3 = 76{,}6^0$ С. Звідси такі температурні співвідношення мають значення: $T_1 / T_3 = 1{,}15$, $T_2 / T_3 = 1{,}02$. Ці значення можуть бути використані для перерахунку температури жили та ізоляції кабелю за значенням температури на поверхні оболонки, яка вимірюється.

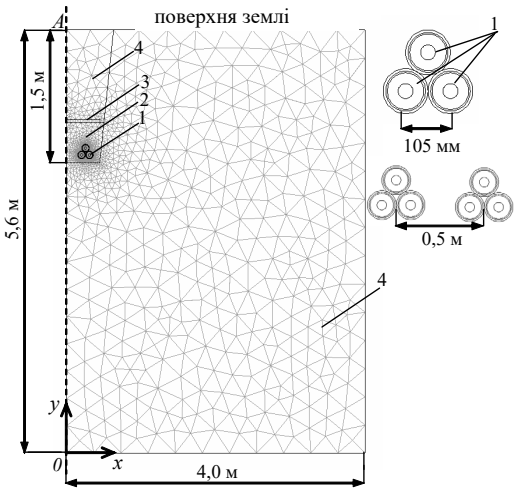

Рис. 2

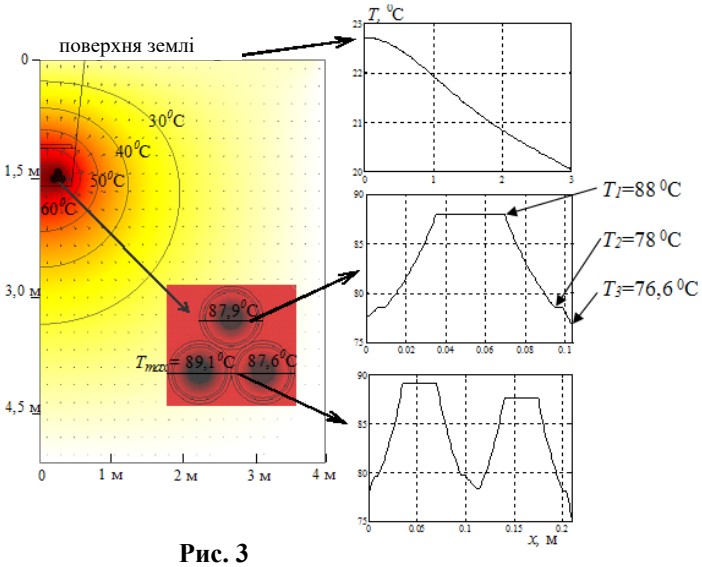

Рис. 3

Висновки. У роботі запропоновано пристрій для дистанційного моніторингу стану високовольтної кабельної лінії. Пристрій дає змогу одночасно вимірювати декілька діагностичних показників – температуру зовнішньої оболонки кабелю, електричний струм у жилі, ємнісний струм на землю – та використовує спеціально створене внутрішнє електричне джерело живлення, що перетворює безпосередньо енергію електромагнітного поля кабелю в електричну енергію з необхідними параметрами.

За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіл температурного поля в активній зоні кабельної лінії та встановлено кількісний зв'язок між температурою на зовнішній оболонці кабелю (яка безпосередньо вимірюється) та значеннями температури жили кабелю та ізоляції, які є важливими діагностичними показниками теплового стану силового кабелю.

Робота фінансувалася частково за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ") (Номер реєстрації 0117U007713, 2017 р.), частково за темою "Розроблення засобів створення інтелектуальних екологічно безпечних силових кабелів для традиційної та відновлюваної електроенергетики" (програма "Нова енергетика", 2019–2021 рр.). КПКВК 6541030.

1. Мокански В. Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем. *Кабели и провода,* № 2 (315). 2009. с. 14–17.
2. Лях В.В., Молчанов В.М., Судаков И.В., Павличенко В.П. Кабельная линии напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16–21.
3. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Численный расчет электромагнитных и тепловых процессов в подземной кабельной линии. Стационарный режим. *Техн. електродинаміка*. Темат. вип. "Силовая электроника и энергоэффективность". 2006. Ч. 1. С. 91–95.
4. Comsol multiphysics modeling and simulation software. http://www.comsol.com/ (дата звернення: 15.06.2020)
5. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ . М.: Папирус-Про. 2005. Т. 4. 640 с.

УДК 621.315.2

СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

А.А.Щерба, чл.-кор. НАН України, **А.Д. Подольцев,** докт. техн. наук**, И.Н. Кучерявая,** докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина
e-mail: podol@ied.org.ua

В работе предложено устройство дистанционного мониторинга состояния высоковольтной кабельной линии, которое позволяет одновременно измерять несколько диагностических показателей – температуру внешней оболочки кабеля, электрический ток в жиле, емкостный ток на землю – и использует специально созданный внутренний электрический источник питания, преобразующий непосредственно энергию электромагнитного поля кабеля в электрическую энергию с необходимыми параметрами. С помощью компьютерного моделирования определено распределение температурного поля в активной зоне кабельной линии напряжением 330 кВ и установлена количественная связь между измеряемой температурой внешней оболочки кабеля и значениями температуры его жилы и изоляции, которые являются важными диагностическими показателями теплового состояния силового кабеля. Библ. 5, рис. 3.
Ключевые слова*:* кабельная линия, мониторинг, диагностика состояния, температурное поле.

SYSTEM FOR REMOTE MONITORING OF HIGH-VOLTAGE CABLE LINE STATE

A.A. Shcherba, A.D. Podoltsev, I.M. Kucheriava
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: podol@ied.org.ua

The article proposes a device for remote monitoring of high-voltage cable line state. The device gives a possibility to measure simultaneously several diagnostic characteristics, i.e. the temperature of cable outer sheath, electric current in cable core, capacitive current to earth and uses a specially designed internal electric power source that directly converts the energy of cable electromagnetic field into electric energy with necessary parameters. By computer simulation, the temperature field distribution in the cable cores of 330 kV cable line is determined and the quantitative relationship between the directly measured temperature on the cable outer sheath and the temperature values of the cable core and insulation, which are important diagnostic characteristics of the thermal state of power cables is revealed. Ref. 5, fig. 3.
Keywords*:* cable line, monitoring, diagnostics of state, temperature field.

1. Mokanski V. High-voltage power cable with integrated fiber-optic module. *Kabeli i provoda.* 2009. No 2 (315). Pp. 14–17. (Rus)
2. Lyach V.V., Molchanov V.M., Sudakov I.V., Pavlichenko V.P. 330 kV cable line is a new step in development of Ukrainian power networks. *Elektricheskie seti i sistemy.* 2009. No 3. Pp. 16–21. (Rus)
3. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Numerical calculation of electromagnteic and thermal processes in underground cable line. Steady-state conditions. *Tekhnichna Elektrodynamika.* Spec. issue Power electronics and energy efficiency. 2006. Part 1. Pp. 91–95. (Rus)
4. Comsol multiphysics modeling and simulation software. http://www.comsol.com/ (accessed: 15.06/2020)
5. Makarov E.F. Handbook on the 4–35 kV and 110–1150 kV power networks. Moskva: Papirus-Pro. 2005. Vol. 4. 640 p. (Rus).

Надійшла 24.06.2020
Received 24.06.2020