

Кабельні системи високої напруги з обладнанням моніторингу робочої температури кабелю

Підбір елементів системи DTS

(За матеріалами РТРiREE «Конференція електроенергетичних повітряних та кабельних ліній високої та надвисокої напруги» м. Вісла 16-17 жовтня 2019р та видання „Energia Elektryczna” жовтень 2019р)

Доктор-інженер Анджей Чіхи (Andrzej Cichy)

Переклад та технічне редагування
Ян Штефунік (Jan Sztefunek)

Введення

Високовольтні кабельні лінії з можливістю вимірювання та контролю їх робочої температури стають стандартними. У цій версії волоконно-оптичні лінії розміщуються в безпосередній близькості від джерела тепла. Найкраще рішення - розмістити волоконно-оптичний модуль під час виробництва кабелю всередині. Найчастіше волоконно-оптичний модуль розміщується всередині екрану, виконаного з мідних проводів. Це дає можливість безперервного вимірювання температури з високою точністю шляхом прямого вимірювання в конкретній точці за допомогою датчика температури та інших шарів кабелю з використанням додаткових обчислень. Вимірювання та розрахунки проводяться в одиницях вимірювання, які зазвичай називаються DTS.

У зв'язку з процесом стандартизації рішень, проведеним деякими операторами системи розподілу, слід розглянути питання про уніфікацію підходу до вимірювання температури кабельних ліній високої напруги. Такій стандартизації може бути піддана як конструкція кабелю з точки зору кількості оптичних волоконних трубок, так і кількість та тип оптичного волокна в окремих трубках. Сам пристрій DTS також може бути підданий цьому процесу. Ця робота є спробою систематизувати підхід до вибору пристроїв для моніторингу температури роботи кабелю та визначити обґрунтовані та технічно можливі вимоги до цих пристроїв на основі наявних пристроїв та технічних рішень.

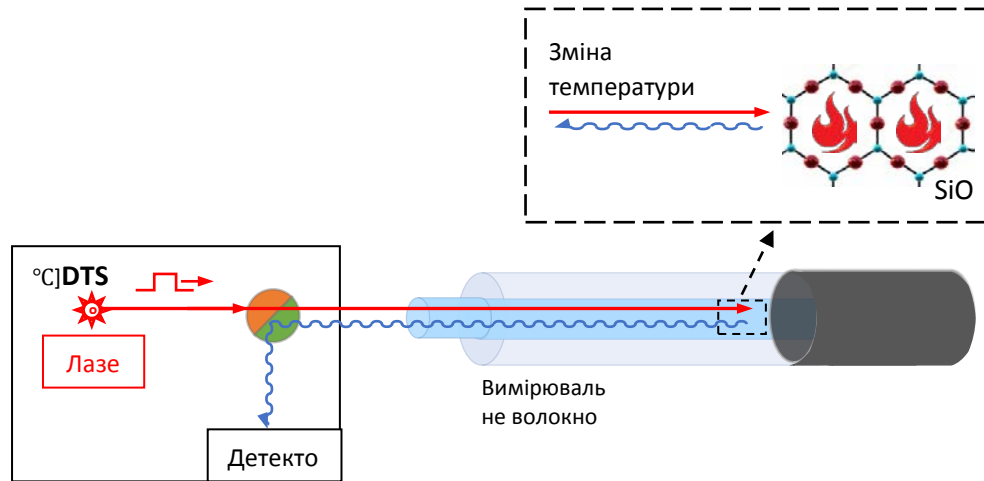
1. Основні поняття та визначення в техніці вимірювання температури кабелю високої напруги.

Нижче наведено визначення та деякі основні поняття, що використовуються в описі методики вимірювання та моніторингу робочої температури кабелю високої напруги.

Оптична довжина (шлях) кабелю - це довжина волоконно-оптичного модуля в кабелі. Зверніть увагу, що ця довжина - це довжина спіралі навколо осі кабелю із заданим діаметром та кроком. Тому фактична оптична довжина кабелю - це довжина, обчислена вздовж осі волоконно-оптичного модуля, намотаного в кабелі.

Довжина траси кабелю - це фактична довжина кабельної лінії (кабельна фаза), обчислена вздовж осі всіх фаз кабелю та потім усереднена.

DTS - вимірювальний прилад (вимірювальний блок), який також називають розподіленою системою вимірювання температури. Ця система має можливість вимірювати температуру на великих відстанях (теоретично до 50 км і більше). Вимірювання температури в пристрої DTS проводиться таким чином, що лазерне світло вводиться в датчик температури (оптичне волокно), який прокладається вздовж випробуваного об'єкта (в даному випадку кабелю високої напруги) і забезпечує безперервний температурний контроль вздовж оптичного шляху досліджуваного об'єкта замість більш традиційного вимірювання в окремій точці. Принцип вимірювання показаний на малюнку нижче.



Мал. 1. Принцип вимірювання температури за допомогою пристрою DTS

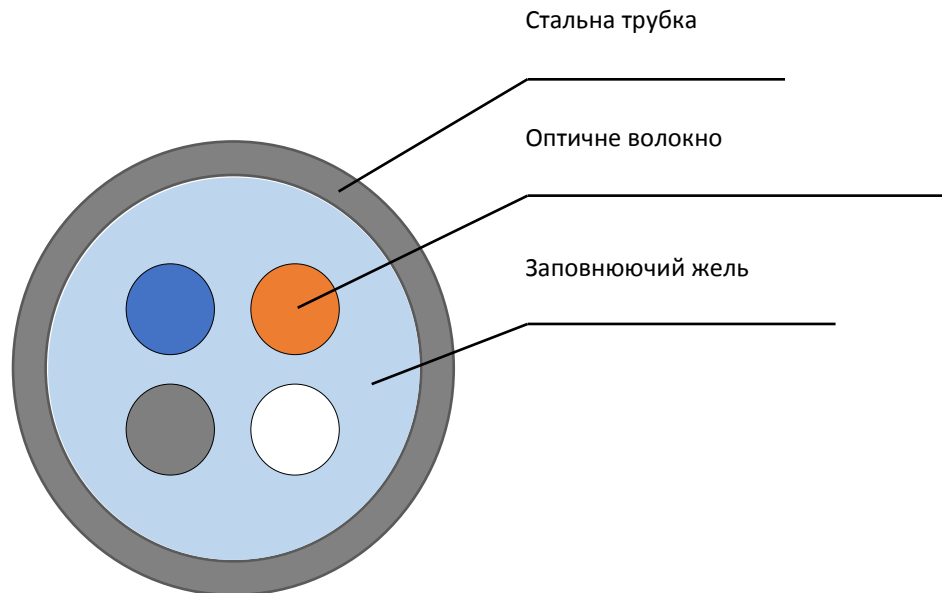
Ефект Рамана застосовується в системах розподіленого виявлення температури, які використовують світловідбивання для вимірювання температури. На одному кінці волокна лазер DTS посилає світловий імпульс через волокно. Ми називаємо цей імпульс падаючим світлом. Більша частина світла рухається вздовж оптичного волокна, але невелика частина розсіюється в кожній точці оптичного волокна. Майже все розсіяне світло має довжину хвилі, ідентичну падаючому світлу, іменовану розсіюванням Релея (мал. 2). Однак невелика кількість розсіяного світла має різну довжину хвилі - це називається ефектом Рамана. На ефект Рамана, зокрема, впливає температура. Коли температура десь уздовж оптичного волокна змінюється, дисперсія змінюється. Це розсіювання складається з розсіювання Стокса та анти-Стокса. Розсіювання Стокса - це світло з більшою довжиною хвилі, ніж падаюче світло, тоді як анти-Стоксове розсіювання має меншу довжину хвилі. Хоча температура лише незначно впливає на розсіювання Стокса, інтенсивність анти-Стоксового розсіювання зростає зі збільшенням температури.

Коли температура змінюється в певному місці, система DTS обчислює як точну температуру, так і її розташування. Температуру визначають шляхом вимірювання різниці між інтенсивністю Стокса та інтенсивністю анти-Стокса. Це робиться за допомогою спрямованого перемикача в лазерному джерелі. Місце зміни температури визначається шляхом вимірювання часу, необхідного для повернення дисперсії до джерела, що дозволяє точно вказати місце зміни.



Мал. 2. Ефект Рамана

Волоконно-оптичний модуль - це датчик температури у вигляді багатомодового або одномодового (або змішаного) оптичних волокон, розміщених у загальній сталевій трубці (як правило, з нержавіючої сталі), як на мал. 3. Стандартна кількість волокон у сталевій трубці становить від однієї до чотирьох, а стандартна кількість волоконно-оптичних труб реалізованих в кабелі високої напруги - один або два (залежно від виробника кабелю).



Мал. 3. Конструкція волоконно-оптичного модулю

Форма хвилі температури, також відома як температурний шлях, або просто форма хвилі - це одиночне вимірювання для заданої оптичної довжини випробуваного об'єкта. Ця форма хвилі читається як відображення, викликане одним лазерним імпульсом (падаючим світлом). **Температурна зона** - це програмний (теоретично) розділ оптичної довжини випробуваного об'єкта, який характеризується подібними умовами монтажу. Поділ таких секцій у програмному забезпеченні, що візуально показує хід температури, дозволяє легше спостерігати за цими секціями, наприклад, особливо вразливими або тими, які розміщені в різних (більш важких) польових умовах. Такими умовами можуть бути:

- перехрестя з підземною інфраструктурою,
- локальні зміни типу оточення кабелю,
- проходи під дорогами, території, які спричиняють постійний важкий доступ вологи до землі.

2. Конструкція кабелю високої напруги з модулем вимірювання робочої температури.

Все частіше застосовуються високовольтні кабелі із вбудованим волоконно-оптичним модулем (мал. 4) для вимірювання та контролю робочої температури лінії. Вони навіть введені як стандарт на території декількох операторів розподілу електроенергії в Польщі. Волоконно-оптичний модуль вбудовується разом із проводами екрану під час виробництва кабелю. Залежно від технічних можливостей виробника, в кожен трубку зазвичай розміщують до двох волоконно-оптичних труб максимально з чотирьох оптичних волокон.



Мал. 4. Конструкція кабелю з волоконно-оптичним модулем.

У зв'язку з тим, що досвід та переваги у різних операторів розподільчих мереж різні, тому ми зустрічаємося з різними вимогами до конструкції самого кабелю, а також волоконно-оптичного модулю. Це, в основному, такі відмінності :

- використання різних типів волокон: багатомодового або одномодового,
- використання різної кількості волоконно-оптичних трубок в одному кабелі (один або два),
- використання різної кількості волокон в одній трубці (від одного до чотирьох).

До недавнього часу існувало переконання, що багатомодові волокна повинні використовуватися для моніторингу температури коротких кабельних ліній та одномодового - для довгих ліній. Цей погляд є результатом попередніх технологічних обмежень пристроїв DTS. У перші роки використання приладів моніторингу температури потужність лазера була низькою, що приводило до обмеження діапазону (до 10 км). Однак з часом розвиток вимірювальних технологій спричинив те, що зараз для багатомодових волокон максимальні вимірювані оптичні довжини становлять 50 км і більше. З цієї причини не потрібно використовувати одномодові волокна, граничне значення затухання сигналу яких значно нижче багатомодових волокон. Практика побудови кабельних ліній високої напруги показує, що одномодові волокна зазнавали механічних пошкоджень більше разів під час монтажу кабельних ліній, що свідчить про їх меншу механічну стійкість. Також обслуговування одномодових волокон під час монтажу вимагає більш високої технічної культури, ніж багатомодові волокна. Ці міркування також говорять про переваги багатомодових волокон.

Кількість волоконно-оптичних трубок в кабелі залежить від уподобань користувача, але з точки зору збереження резерву від можливих пошкоджень, рекомендованим рішенням є використання двох волоконно-оптичних трубок, розташованих навпроти периметру екрану кабелю (кожні 180 градусів). Таке розташування трубок збільшує шанси гарантування оптичної безперервності для даного кабелю у разі його пошкодження, наприклад:

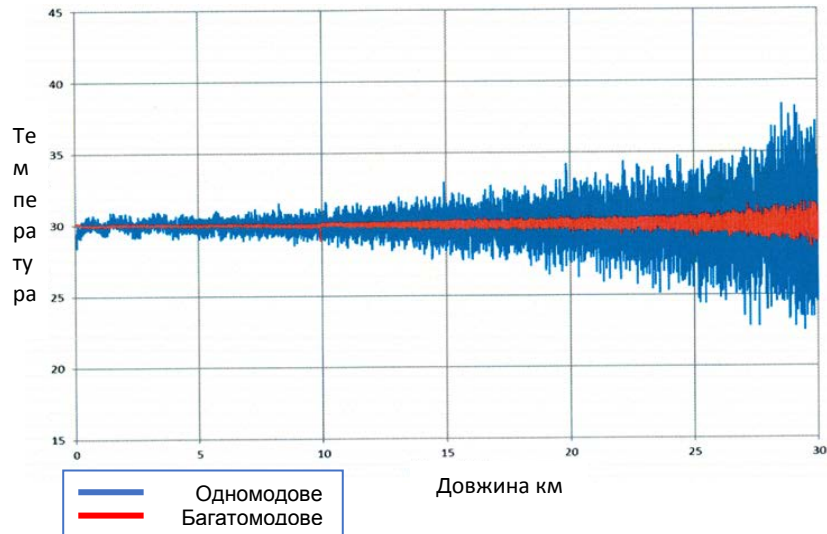
- зовнішні механічні пошкодження,
- коротке замикання в ізоляції кабелю.

Тому представляється розумним використовувати кабель високої напруги у такій конфігурації:

- дві сталеві трубки,
- мінімум два багатомодових волокна в кожній трубці.

Таке розташування волокон відповідає більшості очікувань операторів розподільчих мереж (найчастіше використовується кількість волокон - 4), відповідає принципу резервування оптичних волокон, а використання багатомодових волокон з кращою залежністю затухання від температури

робить їх найкращим рішенням. Звичайно, це твердження можна підлягати обговоренню, але прийняття такого рішення в вигляді стандарту сприяла б уніфікації технічних рішень та їх взаємозамінності у разі, наприклад, аварії.



Мал. 5. Залежність роздільної здатності вимірювання температури залежно від типу волокна (червоний - багатомодовий, синій - одномодовий) і від його довжини

3. Можливості систем DTS на прикладі пристроїв, доступних на ринку.

Для того, щоб описати можливості комерційно доступних систем для вимірювання та контролю температури високовольтних кабелів, необхідно заздалегідь визначити параметри, за допомогою яких описуються їх можливості.

Перший параметр називається поздовжньою або лінійною роздільною здатністю. Цей параметр визначає, яке значення одиниці довжини при передбачуваному часу вимірювання та роздільній температурі дозволить отримати вимірювання температури по всій довжині оптичного шляху досліджуваного об'єкта. Це безпосередньо відповідає ситуації, в якій датчики температури (наприклад, термопари) були би розміщені традиційним способом вздовж оптичного шляху як відстань, що дорівнює поздовжньому (лінійному) дозволу. Звичайно, реалізація такого рішення буде пов'язана з високими витратами на їх реалізацію та високим рівнем відмов кабелю та датчиків.

Наступний параметр - мінімальний час вимірювання. Це час, протягом якого збираються дані про температуру і після цього часу усереднюються. Усереднення полягає в усуненні похибок вимірювання окремих температурних хвиль, які можуть виникати при зчитуванні окремих температурних процесів.

Наступним параметром є температурна роздільна здатність вимірювання. Вказує, з якою точністю подається температура випробуваного об'єкта. У більшості реалізацій ця роздільна здатність становить 1°C і цілком достатня для опису змін температури досліджуваного об'єкта, що є кабельною лінією високої напруги.

Слід пам'ятати, що параметри поздовжньої роздільної здатності, температурної роздільної здатності та часу мають обернено пропорційний вплив один на одного. Це означає, що, коли ми хочемо скоротити (покращити) час вимірювання, параметри поздовжнього (лінійного) та температурного дозволу погіршуються. У випадку кабельних ліній високої напруги, де константа нагріву досить довга, час вимірювання можна продовжити, не погіршуючи результати.

Температурна роздільна здатність для кабелів високої напруги із значенням $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ є достатньою. Фактично для нас поздовжня (лінійна) роздільна здатність - це параметр, який повинен бути максимально точним (бажано близько 1 м).

Висока поздовжня (лінійна) роздільна здатність дозволить для всієї кабельної лінії:

- виявити місцеві (точкові) місця з підвищеною температурою (так звані гарячі точки) внаслідок локального погіршення тепловідведення і, таким чином, і підвищення температури всього досліджуваного об'єкту - кабельної лінії високої напруги,
- спостерігати за вразливими місцями лінії, наприклад кабельними муфтами,
- спостерігати за кабельними переходами, що виконані в ризикованих і місцях (проколи під дорогами, пересічення з іншими кабельними лініями та ін.).

Таким чином, можна сказати, що чим вище поздовжня (лінійна) роздільна здатність, то такий пристрій DTS (весь комплект), так і його умови експлуатації можна вважати оптимально вибраними.

Слід також пам'ятати, що зі збільшенням довжини кабельної лінії, збільшенням місць з'єднання оптичних волокон на оптичну довжину (зварних швів) фізичні можливості пристроїв DTS стають все більш обмеженими, і, незважаючи на зниження вимог до двох інших параметрів, поздовжня (лінійна) роздільна здатність буде погіршуватися та перевищувати значення 1м.

Наступні таблиці показують можливості пристроїв DTS залежно від оптичної довжини датчика, яким є багатомодове волокно для деяких виробників цих пристроїв.

Табл. 1. Прикладові параметри виробника А

Максимальний діапазон пристрою DTS для багатомодового волокна	2 km	6 km	12 km	30 km	50 km
поздовжня (лінійна) роздільна здатність	1 m	1 m	1 m	2 m	4 m
Мінімальний час вимірювання	600 s	600 s	600 s	600 s	900 s
Температурна роздільна здатність	0.1 $^{\circ}\text{C}$	0.5 $^{\circ}\text{C}$	0.2 $^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$

Табл. 2. Прикладові параметри виробника В

Максимальний діапазон пристрою DTS для багатомодового волокна	2 km	6 km	12 km	30 km	45 km
поздовжня (лінійна) роздільна здатність	1 m	1m	1m	1m	1m
Мінімальний час вимірювання	10 s	10 s	10 s	10 s	10 s
Температурна роздільна здатність	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05

Наведені вище дані показують, що поздовжня (лінійна) роздільна здатність довжини кабелю до 20 км для виробника А знаходиться на необхідному рівні (1 м). Зі збільшенням оптичної довжини датчика температури (оптичного волокна) цей параметр погіршується. Це можна усунути за допомогою двостороннього вимірювання, але для цього потрібні більше інвестицій (принаймні

два одиниці DTS на обох кінцях кабельної лінії). Пристрій виробника В має кращі властивості. Через обмежену кількість отриманих даних ця стаття порівнює дані лише двох систем.

4. Висновки

Проаналізувавши попередній досвід встановлення приладів для вимірювання та контролю температури кабельних ліній високої напруги, можна зробити висновки, що:

- стандартизація технічних рішень на більшій кількості операторів розподільчих мереж, може мати позитивні результати з точки зору як користувача, так і постачальника системи (виробника),
- найважливішим параметром є поздовжня (лінійна) роздільна здатність - вона повинна бути максимально високою,
- можливості пристроїв DTS обмежені, і для кабельних ліній великої довжини їх параметри погіршаються,
- при певних складних умовах може виникнути ситуація, коли очікування кінцевого споживача неможливо виконати - технічний діалог повинен вестись з постачальниками вимірювальних систем з реальними можливостями вимірювальних систем,
- Техніка вимірювання температури оптичними волокнами є відносно новою і вона постійно розвивається - сьгоднішні обмеження можуть бути скасовані в майбутньому.

Література:

- [1] Distributed Condition Monitoring of Power Cables – a Brief Update, HENRIK HOFF, AP SENSING GMBH.