
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 681.785.55; 681.786.23; 621.315.14

П. Д. ЛЕЖНЮК, В. В. ЧЕРКАШИНА, О. В. СІКОРСЬКА

ВОЛОКОННО – ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Вінницький національний технічний університет, 21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, E-mail: lezhp@gmail.com

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, E-mail: veronika2473@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, 21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, E-mail: olenasikorska@ukr.net

Анотація. В статті представлено фізичні властивості і принцип дії волоконно-оптичного датчика на базі бреггівської решітки та проаналізовано його показники. Запропоновано схеми волоконно-оптичного сенсору в залежності від призначення волоконного світловоду у датчику. Обґрунтовано доцільність застосування розподіленого волоконно-оптичного датчика для контролю режимних і конструктивних параметрів повітряних ліній електропередачі шляхом аналізу показників чутливості бреггівської решітки до температурних діапазонів проводів і механічного зусилля, а також необхідність врахування під час проектування оснащення ліній системами моніторингу з розподіленим волоконно-оптичним датчиком.

Ключові слова: бреггівська решітка, волоконно-оптичний датчик, комбінаційне розсіювання, надійність, повітряна лінія електропередачі.

Abstract. The article presents the physical properties and principle of operation of a fiber-optic sensor based on a Bragg grating and analyzes its indicators. Schemes of a fiber-optic sensor are proposed depending on the purpose of the optical fiber in the sensor. The expediency of using a distributed fiber-optic sensor to control the operational and structural parameters of overhead power lines is substantiated by analyzing the sensitivity indicators of the Bragg grid to the temperature ranges of the wires and mechanical force, as well as the need to take into account during the design of equipping the lines with monitoring systems with a fiber-optic sensor.

Key words: Bragg grating, fiber optic sensor, Raman scattering, reliability, overhead power line.

DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-213-221

ВСТУП

Розвиток волоконно-оптичних технологій дозволяє передавати дані за допомогою світлових хвиль зі швидкістю, яка досягає кількох терабіт за секунду. Величезною перевагою цих технологій є передача даних без будь-яких перешкод тому, що оптичні волокна нечутливі до електромагнітного впливу та агресивних середовищ, а також мають можливість мультиплексування [1 - 3].

Сучасні волоконно-оптичні датчики (ВОД) дозволяють вимірювати багато фізичних параметрів: деформацію, тиск, температуру, відстань, положення в просторі, швидкість лінійного переміщення та обертання, прискорення, коливання, масу і т.п. [4].

Завдяки цим унікальним властивостям використання ВОД являється доцільним у вирішенні наукових та практичних завдань пов'язаних з вимірюванням температури, деформації та інших параметрів протяжних об'єктів, до яких відносяться і повітряні лінії електропередачі (ПЛ).

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ

Основним показником ПЛ в реальному часі являється допустимий струм, за якого лінія функціонує без порушень правил техніки безпеки, цілісності матеріалів і надійності [5, 6]. Коли струм, який протікає по проводах ПЛ збільшується, провід нагрівається і подовжується, що приводить до порушення режимної надійності електропередачі. В результаті подовження проводу стріли провисання можуть виходити за допустимі межі, що спричиняє зміни в габаритах ліній і, відповідно, порушення конструктивної надійності об'єкту [7].

Традиційно значення теплових показників ПЛ установлюють за довідниковими даними під час проектування об'єктів електричних мереж (ЕМ). Такі показники засновано на певних уявленнях про швидкість вітру, температуру навколишнього середовища і сонячне випромінювання [8]. Але, так як в реальному часі метеорологічні умови змінюються, тому для ефективного керування режимами ЕМ має сенс отримувати дані про поточний стан ПЛ в залежності від параметрів навколишнього середовища замість фіксованих, консервативних уявлень, що дозволить скорегувати використання реальної пропускної здатності ЕМ.

На сьогодні як в Україні так і в зарубіжних країнах активно відбувається цілеспрямоване вивчення питань моніторингу ПЛ за допомогою ВОД. І в зарубіжних ЕМ вже впроваджуються системи моніторингу (СМ) з ВОД для контролю параметрів ПЛ, які забезпечують системного оператора інформацією щодо режимних та конструктивних параметрів ліній в реальному часі [9]. СМ складаються із вимірювальних датчиків, які пов'язані каналами зв'язку з системами диспетчерського керування режимами роботи ЕМ. Найважливішим елементом СМ являється ВОД, на функціонування якого впливають не тільки параметри режиму роботи лінії і метеорологічні умови, а також властивості матеріалу з якого виготовлено датчик. ВОД може бути виконаний як класичними та фоновими двопробієвими оптичними волокнами, так і з використанням волоконної бреггівської решітки [1, 3, 4, 10].

Впровадження зарубіжного досвіду в українські ЕМ покращить режимну і конструктивну надійність ЕМ й зменшить витрати на обслуговування ліній за рахунок отримання оперативних та точних даних про місцезнаходження пошкоджених ділянок, а також дозволить своєчасно запобігти аварійним ситуаціям по трасі лінії.

В зв'язку з цим доцільно використання в українських ЕМ СМ з ВОД, який завдяки оптичним ефектам може вимірювати як температуру проводу, так і його подовження.

Мета статті: дослідити доцільність застосування розподіленого волоконно-оптичного датчика для контролю режимних і конструктивних параметрів повітряних ліній електропередачі та обґрунтувати необхідність врахування під час проектування оснащення ліній системами моніторингу з волоконно-оптичним датчиком для підвищення надійності українських електричних мереж за рахунок покращення систем диспетчерського керування режимами роботи електричних мереж шляхом врахування поточної інформації з ліній електропередачі.

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Фізичні властивості та принцип дії ВОД

Вимірювальним пристроєм у ВОД являється одномодове оптичне волокно. Це скляне волокно малого діаметра, яке дозволяє передавати один світловий сигнал через свою серцевину на довгі відстані. Для визначення температури волокна розроблені та використовуються різні методи, в основі яких лежить вимірювання властивостей оптичного волокна за допомогою тимчасової рефлектометрії. Температура оптичного волокна у певній точці визначається шляхом аналізу параметрів випромінювання комбінаційного розсіювання (КР тобто Раманівського розсіювання) або розсіювання Мандельштама - Брілюєна (РМБ) [11, 12].

РМБ – це розсіювання, яке виникає в результаті взаємодії акустичного фонуна з оптичним випромінюванням зі зміщенням ліній на частоту фонуна, що дозволяє визначити порогову оптичну потужність, яка може бути передана через оптичне волокно. Під час перевищення рівня оптичної потужності в оптичному волокні виникає акустична хвиля, під впливом якої змінюється величина індексу рефракції, що приводить до додаткової генерації акустичних хвиль. Порогова потужність РМБ (P_B) визначається за формулою [11, 12]:

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

$$P_B = \frac{21A_{ef}}{g_B \cdot L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta V_{LS}}{\Delta V_{BW}}\right), \quad (1)$$

де A_{ef} – ефективна площа ядра оптичного волокна; V_{LS} – лінійна ширина смуги лазерного джерела; ΔV_{BW} – смуга взаємодії; g_B – підсилювальний коефіцієнт; L_{eff} – ефективна довжина оптичної лінії.

Ефективна довжина оптичної лінії (L_{eff}) в (1) визначається за формулою:

$$L_{eff} = \frac{4,343}{\alpha} \left[1 - \frac{1}{\varepsilon^{0,23\alpha}}\right], \quad (2)$$

де α – загасання; ε – бітовий інтервал.

Датчики на основі ефекту РМБ вперше з'явилися на початку 90-х років і постійно вдосконалюються, що робить їх прийнятними для контролювати протяжних об'єктів довжиною кілька десятків кілометрів [1, 4, 10, 12, 13].

На основі РМБ сформовано волоконні бреггівські решітки (ВБР) (рис. 1)



Рисунок 1 – Схематичне зображення волоконної бреггівської решітки

ВБР (рис. 1) можуть бути використані у ВОД для вимірювання як температури проводу ПЛ, так і для контролю її габаритів, але не одним оптичним волокном [4, 13б 17-21].

Розподілений ВОД на базі волоконної бреггівської решітки

Найбільш поширений тип ВОД для СМ представляє собою волоконно – оптичний сенсор, який засновано на використанні ВБР, як перетворювача вимірюваної дії в оптичний сигнал. ВБР являється відрізком оптичного волокна з періодичною зміною показника заломлення в серцевині (рис. 1).

Волоконний світловод (ВС) в ВБР-датчику відображає оптичний спектр (світло) з бреггівською довжиною хвилі (λ_B), яка визначається за формулою [2, 10]:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot A, \quad (3)$$

де n_{eff} – ефективний показник заломлення волоконного світловоду; A – період модуляції.

Для визначення можливих зрушень спектральних характеристик ВБР-датчика необхідно визначати його температурну та деформаційну чутливість. Зміни температури та деформації бреггівської решітки впливають зміну показника заломлення серцевини і довжини періоду решітки. Вплив деформації (ε) та зміни температури (ΔT) на зміщення бреггівської хвилі ($\Delta\lambda_B$) можна записати у вигляді залежності [14]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - p_e) \varepsilon + (\alpha_1 + \alpha_n) \Delta T] \quad (4)$$

де: ε – відносна деформація, α_1 – коефіцієнт температурного розширення волокна, α_n – температурно-оптичний коефіцієнт, p_e – коефіцієнт оптичних спотворень, ΔT – зміна температури.

На показники, які пов'язані залежністю (4), впливають режими роботи ПЛ. Так, на деформацію ВБР-датчик впливає механічне зусилля на провід, що викликає зміну центральної бреггівської довжини хвилі на величину $\Delta\lambda_B$, а зміни температури проводу відображаються на оптичному спектрі решітки. Також необхідно звернути увагу на те, що ці два явища можуть одночасно впливати на бреггівську решітку, що провокує виникнення ефекту перекриття. Цей ефект означає, що зміни довжини хвилі ВБР-датчика спричинені як зміною оптичних властивостей скла, з якого виготовлено оптичне волокно з бреггівською решіткою, так і температурними розширеннями матеріалу, яке змінює довжину періоду цієї решітки.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Таким чином, відповідно до властивостей оптичного волокна, ВБР-датчик має хорошу чутливість до температури та деформації. Але розміри стандартних ВБР малі (не більше сантиметра), тому вимірювання значення температури проводу та його подовження відбувається тільки в точці оптичного волокна де знаходиться ВБР. Для розподіленого вимірювання по всій довжині проводу необхідно сформувати в оптичному волокні кілька ВБР. З урахуванням втрат оптичної потужності кількість ВБР в одній волоконній лінії може бути ~100 ВБР. Сенсорну систему з великою кількістю точкових ВБР - датчиків можна вважати розподіленою.

Волоконно-оптичний сенсор з набору ВБР-датчиків для контролю параметрів ПЛ.

Контрольно – вимірювальним елементом волоконно-оптичної СМ являється волоконно – оптичний сенсор, який представляє набір ВБР-датчиків об'єднаних в єдину систему з тієї чи іншої топологічною конфігурацією з заданим алгоритмом опитування. В залежності від призначення ВС у датчику волоконно – оптичні сенсори доцільно розділити на дві групи:

1. ВС виконує тільки транзитну функцію середовища - носія для передачі оптичного випромінювання до чутливого елемента, який розташовано в зоні вимірювань;
2. ВС являється безпосередньо середовищем - носієм передачі сигналів і водночас є чутливим елементом ВОД.

У СМ, які відносяться до 1 групи, чутливий елемент ВОД представляють собою сторонній об'єкт по відношенню до ВС, який має властивість змінювати характеристики світлової хвилі (амплітуда, фаза, поляризація, довжина хвилі і т.п.) внаслідок зміни фізичного параметра. При цьому чутливий елемент знаходиться в контакті з точкою середовища, параметри якої контролюються ВОД. Тому для розподіленого моніторингу повздовжнього контролюемого об'єкта, яким являється провід ПЛ, потрібна наявність кількох ВОД. Кількість точок вимірювання можна визначити як добуток кількості ВОД на число вимірювальних каналів одного ВОД. Схема волоконно – оптичного сенсору 1 групи представлена рис. 2.

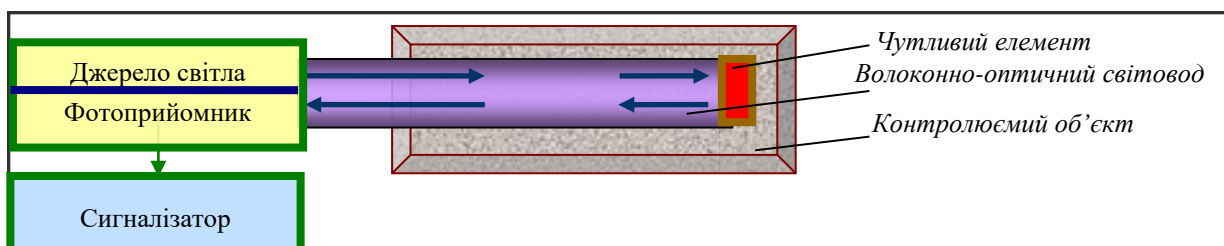


Рисунок 2 – Схема волоконно – оптичного сенсору 1 групи

Волоконо – оптичний сенсор, який підключено за схемою (рис. 1), доцільно використовувати для вимірювання температури проводу. Контролювання температурного режиму ПЛ дозволить підвищити режимну надійність ЕМ за рахунок своєчасного реагування на зміни в технологічному процесі передавання електричної енергії.

Волоконно – оптичний сенсор 2 групи використовує властивості ВС перетворювати вимірювані впливи на відповідні зміни характеристик світлової хвилі, яка поширюється світловодом. В цьому випадку значно спрощується оптична схема вимірювальної системи та з'являється можливість здійснювати розподілений контроль стану об'єкта вздовж траси прокладання ВС, тобто повздовж проводу ПЛ. Відповідну спрощену схему волоконно – оптичного сенсору 2 групи представлено на рис. 3.

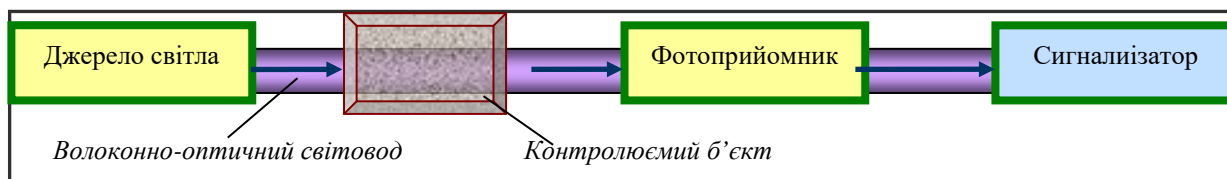


Рисунок 3 – Схема волоконно – оптичного сенсору 2 групи

Волоконо – оптичний сенсор, який підключено за схемою (рис. 2), доцільно використовувати для вимірювання стріли провису проводу. Контролювання габариту ПЛ дозволить підвищити конструктивну надійність ЕМ за рахунок своєчасного реагування на аварійні ситуації в ЕМ.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Волоконно – оптичні сенсори або розподілений ВОД (рис. 2, 3) це безперервний волоконно-оптичний кабель (ВОК) сформований системою з точкових ВБР-датчиків і розміщується вздовж усього контролюемого об'єкту, тобто по всій довжині проводу ПЛ, та підключається до аналізатору [15].

Для оцінки експлуатаційних характеристик ВОД потрібно вимірювати наступні параметри ВОК [16]:

- максимальна й середня потужність немодульованого імпульсного лазерного випромінювання в певному перерізі оптичного волокна;
- розширення імпульсу – зміну форми сигналу, викликану матеріальною дисперсією;
- коефіцієнт відбиття – відношення потужності відбитого сигналу, який поширюється по лінії у зворотному напрямку (від прийомного кінця до передавального), до потужності сигналу, який поширюється в прямому напрямку;
- втрати оптичної потужності – відношення потужностей переданого й прийнятого сигналів, зумовлені коефіцієнтом загасання оптичного волокна;
- відношення сигнал–шум – відношення потужностей корисного сигналу до сумарної потужності всіх шумів у каналі.

СМ з розподіленим ВОД дозволяє вимірювати і аналізувати температуру та стрілу провису проводу ПЛ з можливістю проведення автоматичних вимірювань без присутності оператора протягом тривалого часу. Розклад проведення вимірювань з використанням заданих конфігурацій може бути запрограмовано і збережено в базі даних. Вбудована функція контролю характеристик дозволяє безперервно відстежувати точність вимірювань, і зберігати ці показники разом з даними вимірювань для подальшого аналізу [9, 15].

Можливість контролювати протяжний об'єкт в кожній точці, де інстальований волоконно – оптичний сенсор, в сукупності з високою точністю і автономною роботою в реальному часі роблять систему прийнятною для контролю конструктивних та режимних параметрів ліній.

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ ВОД ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПЛ.

Для обґрунтування доцільності застосування СМ з розподіленим ВОД використовуються параметри ПЛ 110 кВ [5 - 8].

Враховуючи чутливість бреггівської решітки до зміни температури, необхідно враховувати вплив зміни температури проводу ПЛ на спектральні характеристики решітки.

Важливим параметром, який визначає безпечну експлуатацію ПЛ, є збільшення стріли провису за температури проводу в діапазоні 40 – 80 °С. У прольотах довжиною 250 метрів для ПЛ 110 кВ виконаних проводом АС 240/32 мм² стріла провису в цьому діапазоні температур збільшується приблизно на 3 см. Діапазон температур, який прийнято для аналізу, становить від –50°С до +180°С. У реальних умовах одночасне підвищення робочої температури проводу і збільшення стріли провису може відбуватися тільки під дією механічного зусилля зовнішнім фактором, тобто наявністю ожеледо – паморозових відкладень на проводах ПЛ (ОПВ) [5, 8].

Графічне відображення зміни величини стріли провису в залежності від температури проводу і механічного зусилля на нього представлено рис. 4 [5].

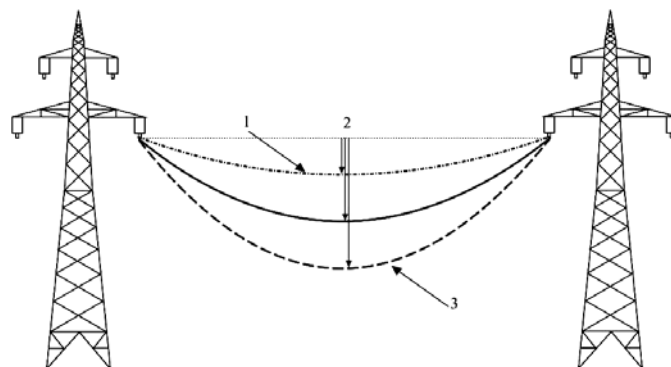


Рисунок 4 – Графічне відображення зміни величини стріли провису проводу ПЛ 110кВ
1 – зменшення температури проводу, 2 – стріла провису, 3 – збільшення температури проводу і наявність механічного зусилля

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

ОПВ утворюється на проводах за рахунок осідання кристалів льоду. Це означає, що відчутне механічне зусилля на провід може відбуватися тільки при низьких температурах. Звідси випливає, що зсув бреггівської довжини хвилі у бік великих довжин хвиль може відбуватися лише за низьких температур. Тому можна припустити, що в діапазоні температур від +20°C до +100°C відсутнє механічне зусилля на провід, яке перевищує 50 МПа за умови, що максимальне механічне зусилля становить 160 МПа в діапазоні температур від -50°C до +20°C. За умови цих припущень певні зрушення центральних довжин бреггівських хвиль можуть бути спровоковані екстремальними умовами, в яких експлуатується ПЛ.

Враховуючи вищенаведене, виконано аналіз чутливості бреггівської решітки до зміни температури проводу ПЛ і її деформації спричиненої механічним зусиллям на провід у відповідних температурних діапазонах (табл. 1).

Таблиця 1

Показники чутливості бреггівської решітки для температурних діапазонів проводів ПЛ

Температура проводу, °C	Зміщення $\Delta\lambda_B$ в залежності від температури проводу, Н/м	Механічне зусилля на провід, МПа	Зміщення $\Delta\lambda_B$ в залежності від механічного зусилля на провід, Н/м	Довжина бреггівських хвиль, λ_B
-50 ÷ +20	1,7	160	6,11	7,85
-20 ÷ +180	4,1	50	1,91	5,97

Як слідує з табл. 1 зі зміною температури проводу ПЛ та наявності механічного зусилля на нього відбувається зміщення бреггівської хвилі, що відображається на її довжині. Тобто, під час проходження сигналу по оптичному волокну відбувається зниження рівня потужності сигналу, крім того, внаслідок дисперсії сигнал виходить спотвореним на прийомному кінці. Тому сигнал необхідно підсилити або регенерувати в процесі передачі. За заданих параметрів регенераторів і кінцевих пристроїв максимальна довжина регенераційної ділянки визначається загасанням і дисперсією. Загасання обмежує відстань по втратах у лінійному тракті, а дисперсія приводить до розширення імпульсів і спричиняє виникнення кодових помилок на прийомі й зниженню якості переданої інформації.

Таким чином, визначення довжини регенераційної ділянки ($L_{\text{екв}}$) доцільно виконувати за двома показниками [16]:

1. Розрахунок довжини регенераційної ділянки за дисперсією:

$$L_{\text{екв}} \leq F_m \cdot \tau_{\text{рез}} \quad (6)$$

де F_m - тактова частота системи передачі ($F_m = 8,448$ МГц); $\tau_{\text{рез}}$ - розширення імпульсів на відстані 1 км у результаті дисперсії.

2. Розрахунок довжини регенераційної ділянки за загасанням:

$$L_{\text{екв}} = (P - 2a_{p,c} - a_{n,c}) / (\alpha + a_{n,c}/L_{\text{б.д}}) \quad (7)$$

де P - енергетичний потенціал системи передачі, дБ ($P = 40$ дБ); $a_{p,c}$ - сумарні втрати, внесені рознімним оптичним з'єднувачем ($a_{p,c} = 1,0$ дБ); $a_{n,c}$ - втрати, внесені нерознімним оптичним з'єднувачем у місці з'єднання оптичних волокон у разі зрощування будівельних довжин лінійного кабелю ($a_{n,c} = 0,3$ дБ); α - розраховане значення коефіцієнта загасання ВОК; $L_{\text{б.д}}$ - будівельна довжина ВОК.

Довжина регенераційної ділянки ($L_{\text{екв}}$) вибирається за найменшим розрахунковим значенням, яке відповідає довжині прольоту ПЛ. Такий розрахунок необхідний для проектування ПЛ, оскільки підсилювачі сигналу монтується на опорах ПЛ.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано фізичні властивості та принцип дії волоконно-оптичного датчика на базі бреггівської решітки, а також його основні показники, які впливають на чутливість датчика до температури та деформації, а саме: довжину бреггівської хвилі і зрушення спектральних характеристик.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

За результатами аналізу встановлено, що волоконно – оптичний датчик на базі бреггівської решітки має хорошу чутливість до температури та деформації, що робить його прийнятним для контролю температури і подовження проводу повітряної лінії.

Запропоновано схеми волоконно – оптичного сенсору в залежності від призначення волоконного світловоду у датчику. Застосування представлених схем формує розподілений волоконно – оптичний датчик для вимірювань температури та стріли провису проводу лінії з можливістю проведення автоматичних вимірювань.

Обґрунтовано доцільність застосування розподіленого волоконно-оптичного датчика для контролю режимних і конструктивних параметрів повітряних ліній електропередачі шляхом аналізу показників чутливості бреггівської решітки до температурних діапазонів проводів і механічного зусилля. Показано необхідність врахування під час проектування оснащення ліній системами моніторингу з розподіленим волоконно – оптичним датчиком.

Представлені дослідження дозволять підвищити режимну і конструктивну надійність електричних мереж за рахунок покращення систем диспетчерського керування режимами роботи мереж шляхом врахування додаткової інформації з повітряних ліній електропередачі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brändle H. Optical fiber sensors for the electric power industry. *Optics and Lasers in Engineering*, V.43, № 3–5. 2005. - S.511 – 526. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2004.02.008>
2. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators*, V. 82, № 1–3, 2000. - S. 40–61. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00368-4](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00368-4)
3. Harasim D., Kisała P. Układy przesłuchujące multipleksowane światłowodowe czujniki Bragga. *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska.*- №5(4), 2015.- S. 77–84. DOI: 10.5604/20830157.1176580
4. Kersey A.D., Davis M. A., Patrick H. J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*. -V. 15, № 8, 1997.- S. 1442–1463. DOI: [10.1109/50.618377](https://doi.org/10.1109/50.618377)
5. Сулейманов В.М., Кацадзе Т.Л. Електричні мережі та системи: *підручник*. - Київ: ТНУУ «КПШ», 2008. 456 с.
6. Малогулко Ю.В., Бурикін О.Б., Кацадзе Т.Л., Нетребський В. В. Електричні системи і мережі. Частина 2: *навчальний посібник* / За ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ 2021. - 158 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Malogulko_P2_2021_159.pdf
7. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с
8. Кацадзе Т.Л. Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання: Практикум [Електронний ресурс]: *навч. посіб.* для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні системи і мережі» - Київ: КПШ ім. Ігоря Сікорського, 2019.— 53 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/431fdf39-6c10-4c9d-bb29-359a91b65af8/content>
9. DITEST STA-R series fiber optic distributed strain and temperature analyzer, <http://www.omnisens.com/ditest/>
10. Dziubiński G., Harasim D., Skorupski K., Mussabekov K., Kalizhanova A., Toigozhinova A. Optymalizacja parametrów światłowodowych czujników do pomiaru temperatury. *Rocznik Ochrona Środowiska*. - V.18, № 2, 2016. - S. 309–324. <https://doi.org/10.24425/mms.2022.143066>
11. Brandmüller J. Rayleigh-Streuung und Rotations-Raman-Effekt von Flüssigkeiten. *Zeitschrift für Physik*. – Berlin, 1955. – Bd.140. – S.75 - 91. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-c1d1e84d-80cd-43ac-97bc-2b9c1ba05178/c/23_dziubinski_optymalizacja_ROS_2_2016.pdf
12. Yonas Muanenda, Claudio J. Oton, Fabrizio Di. Pasquale. Application of Raman and Brillouin Scattering Phenomena in Distributed Optical Fiber Sensing. REVIEW article *Front. Phys.*, 29 October 2019. Sec. *Optics and Photonics* V. 7 – 2019. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00155>
13. Xie F., Zhang S., Li Y., Lee S.B. Multiple in-fiber Bragg gratings sensor with a grating scale. *Measurement*, №. 31.- 2003.- S. 139–142. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(01\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(01)00038-0)
14. Panas P., Skorupski K., Luganskaya S., Mussabekov K. Determination of the spectral characteristics shift in the process of writing fiber Bragg gratings. *Proc. SPIE 11045*, 2019, 62–67. DOI:[10.1117/12.2522394](https://doi.org/10.1117/12.2522394)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

15. П.Д. Лежнюк, М.М. Черемісін, В.В. Черкашина, Волоконно-оптичні технології в моніторингу повітряних ліній електропередачі, *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 30, вип. 2, с. 106–110 <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/430>
16. Черкашина В.В. Розвиток повітряних ліній електропередачі з застосуванням волоконно-оптичних кабелів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2018. № 1. С.30– 33. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/05a4919d-93c9-4f3f-85db-e35015ff7811/content>.
17. Wójcik W., Kisała P., „Modelowanie struktur światłowodowych siatek Bragga wykorzystywanych w układach czujnikowych”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol.53, nr 11'2007, s: 10-14.
18. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., „Nano-measurements of physical quantities by using of the Fiber Bragg Gratings”, X International conference on Physics and Technology of Thin Films ICPTTF-X. Ivano-Frankivs, 2005, pp. 99-102, ISBN 966-8207-30-0. Ukraine 2005. 86
19. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., „The conception of the temperature distribution measurement with the use of the Fiber Bragg Gratings, *Przegląd Elektrotechniczny*”, ISSN 0033-2097, R. 84 NR 3/2008.
20. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., Sobańska K., „Gradient based methods for the inverse problem solution in the fiber Bragg gratings, *Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, ISBN: 83-7085-970-4, pp. 412 - 416.
21. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., Sobańska K., „The direct and inverse problem in fiber Bragg gratings modelling,” *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6608*, art. no. 66081N 2007, pp.6608 1N-1 ISSN 0277-786X, ISBN 9780819467478.

REFERENCES

1. Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brändle H. Optical fiber sensors for the electric power industry. *Optics and Lasers in Engineering*, V.43, No. 3–5. 2005. - S.511 – 526. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2004.02.008>
2. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators*, V. 82, No. 1–3, 2000. - S. 40–61. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00368-4](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00368-4)
3. Harasim D., Kisała P. Układy przesłuchujące multipleksowane światłowodowe Bragg sensors. *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska.*- №5(4), 2015.- S. 77–84. DOI: 10.5604/20830157.1176580
4. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*. -V. 15, No. 8, 1997. - S. 1442–1463. DOI: 10.1109/50.618377
5. Suleymanov V.M., Katsadze T.L. *Electrical networks and systems: a textbook*. - Kyiv: TNUU "KPI", 2008. 456 p.
6. Malogulko Yu.V., Burykin O.B., Katsadze T.L., Netrebskyi V.V. *Electrical systems and networks. Part 2: study guide / Ed. P. D. Lezhnyuk*. – Vinnytsia: VNTU 2021. - 158 p.
7. Rules for the arrangement of electrical installations (PUE). The publication is official. Ministry of Energy and Coal of Ukraine. - X.: "Fort" Publishing House, 2017. - 760 p
8. Katsadze T.L. Basics of mechanical calculations of overhead power lines: Workshop [Electronic resource]: training. manual for students specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", educational program "Electrical systems and networks" - Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2019.— 53 p.
9. DITEST STA-R series fiber optic distributed strain and temperature analyzer, <http://www.omnisens.com/ditest/>
10. Dziubiński G., Harasim D., Skorupski K., Mussabekov K., Kalizhanova A., Toigozhinova A. Optimization of the parameters of light sensors for temperature measurement. *Rocznik Ochrona Środowiska*. - V. 18, No. 2, 2016. - S. 309–324. <https://doi.org/10.24425/mms.2022.143066>
11. Brandmüller J. Rayleigh-Streuung und Rotations-Raman-Effekt von Flüssigkeiten. *Zeitschrift für Physik*. - Berlin, 1955. - Bd.140. – S.75 - 91.
12. Yonas Muanenda, Claudio J. Oton, Fabrizio Di. Pasquale. Application of Raman and Brillouin Scattering Phenomena in Distributed Optical Fiber Sensing. REVIEW article *Front. Phys.*, 29 October 2019. Sec. Optics and Photonics V. 7 – 2019. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00155>
13. Xie F., Zhang S., Li Y., Lee S.B. Multiple in-fiber Bragg gratings sensor with a grating scale. *Measurement*, no. 31.- 2003.- S. 139–142. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(01\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(01)00038-0)

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

14. Panas P., Skorupski K., Luganskaya S., Mussabekov K. Determination of the spectral characteristics shift in the process of writing fiber Bragg gratings. Proc. SPIE 11045, 2019, 62–67. DOI:10.1117/12.2522394
15. P.D. Lezhniuk, M.M. Cheremisin, V.V. Cherkashina, Fiber-optic technologies in monitoring overhead power lines, Opt-el. inf-energy tech., vol. 30, issue 2, p. 106–110
16. Cherkashina V.V. Development of overhead power lines using fiber optic cables. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, 2018. No. 1. P.30– 33.
17. Wójcik W., Kisała P., „Modelowanie struktur światłowodowych siatek Bragga wykorzystywanych w układach czujnikowych”, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol.53, nr 11’2007, s: 10-14.
18. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., „Nano-measurements of physical quantities by using of the Fiber Bragg Gratings”, X International conference on Physics and Technology of Thin Films ICPTTF-X. Ivano-Frankivs, 2005, pp. 99-102, ISBN 966-8207-30-0. Ukraine 2005. 86
19. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., „The conception of the temperature distribution measurement with the use of the Fiber Bragg Gratings, Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, R. 84 NR 3/2008.
20. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., Sobańska K., „Gradient based methods for the inverse problem solution in the fiber Bragg gratings, Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN: 83-7085-970-4, pp. 412 - 416.
21. Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., Sobańska K., „The direct and inverse problem in fiber Bragg gratings modelling,” Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6608, art. no. 66081N 2007, pp.6608 1N-1 ISSN 0277-786X, ISBN 9780819467478.

Надійшла до редакції 15.04.2024 року

ЛЕЖНЮК ПЕТРО ДЕМ'ЯНОВИЧ – д.т.н., професор, професор кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна, *e-mail:* lezhpd@gmail.com

ЧЕРКАШИНА ВЕРОНІКА ВІКТОРІВНА – д.т.н., доцент, професорка кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, *E-mail:* veronika2473@gmail.com

СІКОРСЬКА ОЛЕНА ВІКТОРІВНА – к.т.н., старший викладач кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна, *e-mail:* olenasikorska@ukr.net

P.D. LEZHNIUK, V.V. CHERKASHYNA, O.V. SIKORSKA

FIBER-OPTICAL SENSOR FOR CONTROL OF PARAMETERS OVERHEAD POWER LINES

Vinnytsia National Technical University
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Vinnytsia National Technical University