

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
СУЧАСНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

О.В. Кириленко*, академік НАН України, **А.А. Щерба**** , чл.-кор. НАН України,
І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: sh1ch@ied.org.ua

У роботі проведено огляд волоконно-оптичних технологій в електроенергетиці, зокрема для моніторингу сучасних силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену та з інтегрованими в їхню структуру волоконно-оптичними модулями. Представлено нові інтелектуальні засоби контролю електричних, теплових, механічних характеристик та рівня часткових розрядів у кабельних лініях. Описано сучасний досвід використання інтелектуальної системи захисту кабелів і кабельних ліній від аварійних ситуацій. На основі аналізу ефективності сучасних методів моніторингу рівня часткових розрядів, розподілу температури і механічних ушкоджень зміцненої поліетиленової ізоляції та інших елементів високо- і надвисоковольтних кабелів з інтегрованими волоконно-оптичними модулями показано перспективу розвитку технологій інтелектуальної діагностики технічного стану та надійності потужних кабельних ліній електропередачі (ЛЕП). Обґрунтовано, що використання волоконно-оптичних модулів у структурі силових кабелів та комп'ютерних методів обробки інформації відносно змінення теплових і механічних характеристик елементів потужних кабелів підвищує ефективність інтелектуальних технологій моніторингу технічного стану сучасних електроенергосистем, автоматичного регулювання режимів їхньої електропередачі та захисту від аварійно небезпечних ситуацій. Бібл. 51, рис. 8.

Ключові слова: високо- і надвисоковольтні кабелі, інтегровані волоконно-оптичні модулі, моніторинг рівня часткових розрядів, змінення розподілу температури і механічних ушкоджень, інтелектуальна діагностика.

Вступ. В останні роки в розвинених країнах світу інтенсивно розробляються нові інтелектуальні технології моніторингу технічного стану сучасних високовольтних силових кабелів шляхом інтеграції в їхню конструкцію волоконно-оптичних модулів (ВОМ). У такому випадку поточний моніторинг потужних кабельних ЛЕП, автоматичне регулювання їхніх режимів та захист від аварійно небезпечних ситуацій проводиться без відключення кабельних ліній від генераторів та споживачів електроенергії [1–4]. Оптичне волокно у вигляді ниток з оптично прозорого матеріалу (скла, пластику) широко застосовується в енергетиці [1–4], телекомунікаційних мережах, оскільки воно дає змогу здійснювати найбільш досконале та ефективне передавання інформації на більш далекі відстані та з більш високою швидкістю, ніж електронні засоби зв'язку. Волоконно-оптичні системи мають підвищену стійкість до термічних, електромагнітних та радіаційних впливів і можуть використовуватися на відповідальних енергетичних об'єктах [4–6], включаючи АЕС.

Використання волоконно-оптичних систем ґрунтується на передачі когерентних світлових імпульсів від лазерного випромінювача, що вбудовується на одному кінці волокна. Такі системи мають прозору серцевину з легованого кварцового скла, що захищається спеціальною зовнішньою оболонкою з термопластичних матеріалів або металевих сплавів.

Переваги волоконно-оптичних систем такі: малі габаритні розміри і вага, простота їхнього монтажу та обробки інформації; висока пропускна здатність та швидкість передачі інформації (до 10 Гбіт/с на відстані до сотень кілометрів за незначного затухання сигналу); стійкість до перегріву та впливу агресивних середовищ; нечутливість до радіоперешкод, дії сильних електромагнітних полів та використання різних засобів екранування; екологічність за рахунок відсутності негативного впливу на навколишнє середовище.

В енергетиці ВОМ використовуються в силових кабелях для зв'язку між силовими підстанціями, зокрема, для захисту потужних ЛЕП від прямих ударів блискавок [6] та виникнення аварійних коротких замикань. Кожна електростанція має захисну автоматику, для забезпечення надійності якої

необхідно реалізувати швидке з'єднання між станціями, що і обумовлює необхідність використання ВОМ у сучасних силових кабелях.

ВОМ застосовуються в силових лініях для провідників під напругою, заземлюючих провідників, у блискавковододах та потужних кабельних ЛЕП. Завдяки використанню ВОМ, диспетчер може здійснювати поточний моніторинг технічного стану та динамічного завантаження кабельних ЛЕП, а в перспективі й їхнє інтелектуальне (smart) управління.

Крім зазначеного, у теперішній час на високовольтних та надвисоковольтних ЛЕП застосовують ВОМ задля створення у подальшому глобальної системи, що буде поєднувати інтернет-зв'язок, телекомунікації та інші види швидкого обміну інформацією. Багато інтернет-провайдерів намагаються впроваджувати ВОМ для досягнення високої пропускної здатності комп'ютерної мережі – зі швидкістю передачі даних до 10–100 Гбіт/с [7].

В Україні лідером виробництва ВОМ для силових кабелів є завод "Південкабель" (м. Харків), який зокрема застосовує такі модулі як елемент конструкції сучасних високо- та надвисоковольтних кабелів зі зшитю поліетиленовою ізоляцією (ЗПЕ) [8]. Оптичне волокно вбудовується переважно в мідний екран кабелів для моніторингу температури на поверхні ізоляції та рівня часткових розрядів в її об'ємі. Це виконується таким чином, щоб не руйнувалася поверхня і структура полімерної ізоляції, яка наноситься на струмопровідну жилу високо- та надвисоковольтних кабелів з використанням складної електромеханічної системи [9]. Важливо те, що ВОМ є стійкими до сильних електромагнітних полів, які виникають як в елементах кабелів [5], так і зовні, незважаючи на використання різних способів їхнього зменшення [10].

Оптичні волокна використовуються також для виготовлення точкових і розподілених датчиків [2, 3] у просторі навколо кабельних ЛЕП. Точкові датчики мають широке промислове застосування для вимірювання напруги, індукованих струмів, температури, тиску, положення та вібрації [2], а розподілені датчики можуть контролювати такі величини як температура та деформація в сотнях тисячах точках і здатні вимірювати їх на великих відстанях – в десятки кілометрів [3].

У зв'язку з актуальністю проблеми експлуатаційної надійності та безпеки кабельних систем шляхом оснащення їх сучасними засобами моніторингу і діагностики *метою даної статті* є проведення огляду новітніх інтелектуальних технологій для контролю в режимі реального часу технічного стану силових кабелів зі зшитю-поліетиленовою ізоляцією на основі волоконно-оптичної технології та створення тим самим інформаційного підґрунтя для розробки та технічної реалізації аналогічних технологічних рішень і засобів в Україні.

Волоконно-оптична система вимірювання температури DTS (distributed temperature sensing). У системі DTS розподілений датчик температури (distributed temperature sensor) складається з двох частин – опитувального пристрою з лазерним джерелом і волоконно-оптичного вимірювального модулю, інтегрованого в конструкцію високовольтного кабелю. Принцип роботи системи розподіленого датчика відображено на рис. 1 і полягає в наступному [11]. Від лазерного джерела когерентного електромагнітного випромінювання в оптичному діапазоні генерується імпульс, що характеризується зворотним розсіюванням у кожній точці волоконно-оптичного кабелю. За аналізом спектру зворотного розсіювання визначається температура значного набору точок уздовж кабелю.

Система моніторингу температури силового кабелю (рис. 2 згідно з [12, 13]) вміщує єдиний апаратний блок, у якому знаходяться блоки лазерного випромінювання, вимірювальні блоки, засоби обробки сигналів і зберігання даних, комп'ютерні засоби та оптична розподільна система, до якої підключаються оптичні волокна кабельної лінії. Оптичні волокна вбудовуються безпосередньо в силовий кабель або прикріплюються до нього зовні, що надає можливості реєструвати профіль температури вздовж усієї кабельної лінії [12, 13].

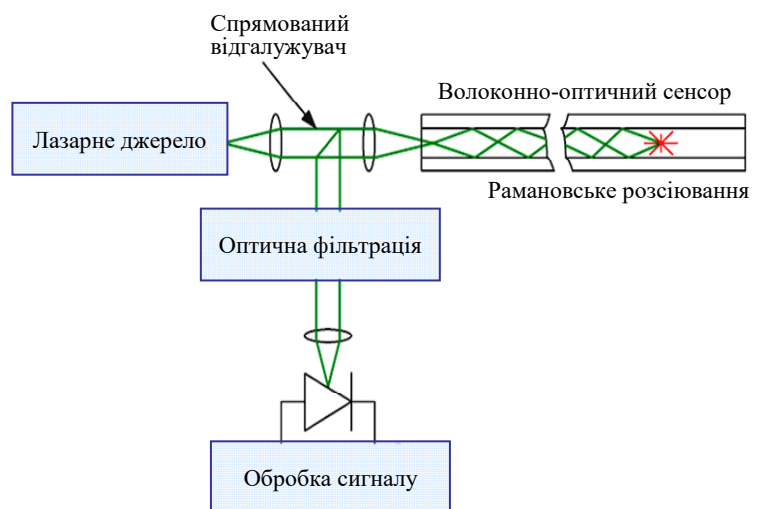


Рис. 1

Для контролю температури високовольтних кабельних ліній у світі широко застосовується волоконно-оптична система DTS, заснована на використанні розподілених датчиків, і принципі затухання сигналу в залежності від температури [11–13]. Оптичні волокна розташовуються, наприклад, у провіднику кабелю і підключаються до пристрою контролю температури жили кабелю. Волокна за рахунок своєї деформації та явища демпфірування [14] можуть також реагувати на механічні змінення та порушення в структурі матеріалу кабелю. На оптичне волокно впливають не тільки температура, але й тиск і сила розтягування, які локально змінюють властивості світловодів. Моніторинг температурних та механічних характеристик кабельних ліній дає змогу здійснювати їхнє інтелектуальне управління в складі "розумних" електричних мереж – Smart Grids.

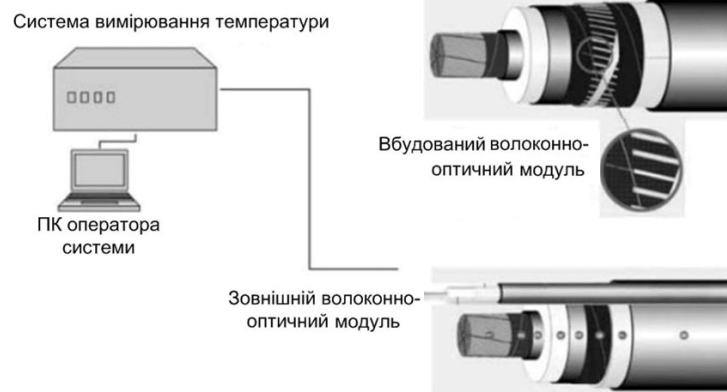


Рис. 2

Система DTS для вимірювання температури складається з блоку формування сигналу з частотним генератором, лазера, оптичного модуля, приймального та мікропроцесорного блоків, а також світловодного кабелю (кварцового скляного волокна) як лінійного температурного датчика. Такі системи застосовують як у силових кабельних лініях, так і на повітряних лініях електропередачі, а також у багатьох промислових процесах, наприклад, у системах пожежного оповіщення, контролю температури у разі хімічних процесів та ін.

Як зазначено вище, у системі DTS використовується розподілений температурний датчик, який контролює температуру в багатьох точках. Систему DTS з кабелем та параметри оптичного волокна, що застосовується у теперішній час, наведено у статті [15].

До переваг та можливостей системи DTS відносяться [1, 3, 11, 15]: моніторинг параметрів кабелів у реальному часі; велика дальність вимірювання – до 20 км; вимірювання температури на заданій ділянці об'єкту по його поверхні або об'єму; висока чутливість; широкий температурний робочий діапазон; точне визначення найбільш нагрітих зон (зон перегріву); одночасна реєстрація одним датчиком декількох параметрів; аналіз та передача даних з оцінкою змінення температури у часі в локальній зоні; оптимізація потужності, що подається (за допомогою відповідного програмного забезпечення впроваджується система автоматичного контролю потужності, що подається); оцінка терміну експлуатації кабелю; контроль стану кабельних муфт; додаткове раннє виявлення загоряння кабелів у тунелях та лотках.

Для експлуатуючих організацій система DTS надає можливості зниження кількості перебоїв в електропостачанні, запобігання аварійним ситуаціям, оперативного реагування на виникаючі перегріву, використання резервів існуючих потужностей, забезпечення економічного і тривалого функціонування кабельних ліній.

Smart кабелі. В 1999 р. на конференції CIRED'1999 (International Conference on Electricity Distribution) доповідалося про використання волоконно-оптичної технології в кабелях середньої напруги із ЗПЕ ізоляцією [16]. Представлені силові кабелі із ЗПЕ ізоляцією на напругу 6/10 кВ для періодичного вимірювання температури мали два оптичні волокна, інтегровані в екран з мідних дротів. З метою захисту оптичних волокон спеціальними заходами адаптувалися кабельні з'єднувальні муфти. У роботі [16] кабель було названо smart кабелем. Відзначено також, що використання оптичного волокна, вбудованого в структуру кабелю, або окремих оптичних датчиків струму створює можливість для виявлення зон локального перегріву та механічних деформацій, проникнення вологи всередину кабелю, його захисту шляхом швидкого визначення пошкоджень і дефектів на ранніх стадіях розвинення. Зокрема на рис. 3, а показано змінення температури підземного 50 кВ кабелю із ЗПЕ ізоляцією (на глибині 1,2 м) вздовж більше 1,4 км [16].

У статті [17] повідомляється про мережу SP PowerGrid, створену в Сінгапурі в жовтні 2003 р. Усі силові кабелі на напругу 400 кВ і частина 230 кВ кабелів встановлено в цій мережі з волоконно-оптичними датчиками для моніторингу температури на поверхні кабелів. Зокрема оптичне волокно

розташовано на поверхні кабелю середньої фази. За допомогою DTS системи температура кабелів у мережі вимірюється та оновлюється з інтервалом від 10 до 50 хвилин.

На рис. 3, б показано типовий профіль температури для кабельної лінії напругою 230 кВ з чотирма гарячими точками – *A, B, C, D* на обраному відрізку траси довжиною більше 11,4 км. Точка *A*, що відповідає найбільшому нагріву, знайдена у локальній зоні кабелю, розташованого на глибині 5 м під бетонною дорогою [17]. Зазначимо, що залежність температури на рис. 3, б отримано за допомогою DTS системи.

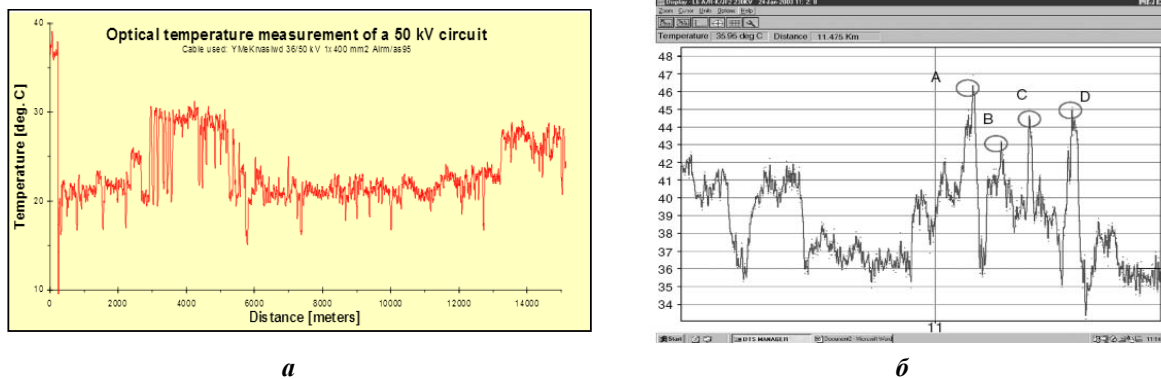


Рис. 3

Виявлення гарячих точок на трасі кабельної лінії важливо задля забезпечення її надійної роботи. Згідно з даними [17], отримана інформація призначається для своєчасного коректування навантажувальної здатності підземної кабельної лінії і оперативного проведення заходів щодо використання допоміжних "коригувальних" засипних ґрунтів та/або зволоження ґрунту в локальних зонах гарячих точок лінії.

У наведеному прикладі та в загальному випадку застосування інтелектуальної системи розподіленого вимірювання температури DTS дає змогу [17]: контролювати температуру кабелів по всій довжині кабельної лінії; визначати зони перегріву; коректувати припустиму пропускну здатність лінії; управляти роботою кабельної лінії на основі даних моніторингу.

Необхідність оснащення кабельних ліній напругою 110–500 кВ із ЗПЕ ізоляцією системами моніторингу температури в режимі реального часу обґрунтовано в статтях [18, 19].

У кабельній мережі з системою DTS BOM можуть бути вбудовані по-різному. Вони можуть бути елементом конструкції кабелю, наприклад, розташовуватися в структурі мідного екрана (рис. 4 [20]). Крім того, BOM у кабелях можуть розміщуватися різними способами [15]: знаходитися під металевим екраном, під зовнішньою оболонкою над металевим екраном, входити до складу металевого екрана (наприклад, розташовуватися всередині трубки з нержавіючої сталі як елемента екрана аналогічно рис. 4) і бути у складі конструкції струмопровідної жили [15, 20, 21].

Слід також зауважити, що BOM можна розташовувати по-різному і поза кабельною системою [15].

На думку авторів, найкращим слід визнати інтеграцію двох або 4-х BOM у мідний екран кабелів. У такому разі ці модулі будуть максимально близькими до ЗПЕ ізоляції кабелю, не ушкоджуючи її поверхні та структури. А головним є те, що найбільш відповідальним є контроль температури ЗПЕ ізоляції, яка є вразливою до термозбурень. У першу чергу такі модулі доцільно інтегрувати в структуру сучасних кабелів на високі та надвисокі напруги для Smart Grids, як показано, наприклад, на рис. 4.

Якщо в мідний екран кабелів інтегрувати чотири такі модулі, можливо здійснювати як поздовжній, так і поперечний моніторинг температури по всій поверхні ЗПЕ ізоляції кабелів та швидко і надійно передавати на великі відстані будь-які інформаційні сигнали. Зокрема, відомий виробник кабельно-провідникової продукції фірма TKD Kabel GmbH (Німеччина) пропонує підводні кабелі із ЗПЕ ізоляцією та з інтегрованим оптичним волокном, які дозволяють ефективно управляти своїми параметрами на основі моніторингу температури та механічних напруг, а також у найближчому майбутньому виявляти наявність вологи в кабелях на різних ділянках ЛЕП [20, 22].

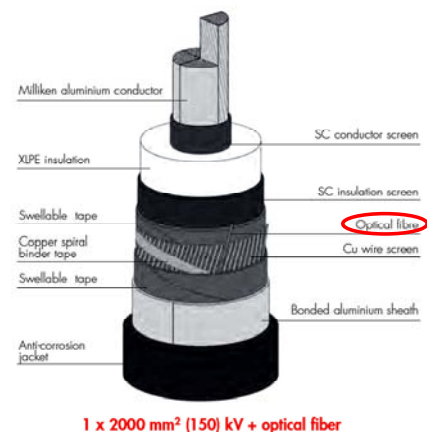


Рис. 4

Моніторинг технічного стану муфт кабельних ЛЕП можливо також здійснювати з використанням ВОМ та діагностичної системи DTS. Гнучкий ВОМ може обвивати з'єднувальну кабельну муфту, як показано на рис. 5, а [11], або розташовуватися на її поверхні (рис. 5, б) [1].

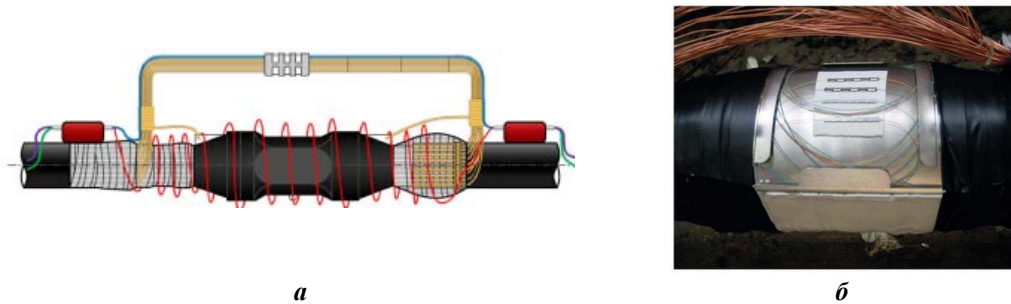


Рис. 5

Прикладом сучасних датчиків для моніторингу силових кабелів та кабельних муфт є серія волоконно-оптичних аналізаторів розподілу температури та механічних напруг DITEST (distributed temperature and strain sensing) швейцарської фірми Omnisens з характеристиками [23]: довжина кабельної лінії – до 50 км; кількість точок вимірювання – 100000; просторовий інтервал – 0,1 м; вимірювана температура (від -273°C до 700°C) обмежувалася властивостями ВОМ. Зокрема, температурний діапазон покриття оптоволокна в роботі [15] складав від -60°C до 200°C ; точність визначення температури – $0,1^{\circ}\text{C}$; температура навколишнього середовища – від 0 до $+40^{\circ}\text{C}$. Згідно з даними [15] під час випробувань кабелів на нагрів максимальна температура досягала для струмопровідної жили $98-101^{\circ}\text{C}$, дрогового мідного екрану – $225-238^{\circ}\text{C}$ та для ВОМ у металевій трубі – $195-202^{\circ}\text{C}$.

Сучасні системи моніторингу кабельних ліній у складі Smart Grids. Основна ідея Smart Grid полягає в підвищенні надійності та якості енергопостачання, насамперед, за рахунок використання нових технологій, зокрема, технологій розподіленої автоматизації, що реалізують моніторинг струму та напруги і переривання струму пошкодження, а також контроль механічних і температурних характеристик. Моніторинг та знаходження місць пошкоджень високовольтних і надвисоковольтних кабельних ліній у режимі on-line має велике значення для надійної роботи Smart Grids [24], що реалізується впровадженням у структуру енергомереж інтелектуальних датчиків та елементів дистанційного контролю.

Зауважимо, що у високовольтних кабельних ЛЕП діагностика часткового розряду (ЧР) здатна упереджувати проблеми з ізоляцією та пошкодженнями кабелів. Локалізація руйнації кабельних ЛЕП та виникаючих в них дефектів шляхом моніторингу ЧР пов'язана з тим, що виникнення й розвиток майже всіх дефектів у ЗПЕ ізоляції сучасних високовольтних кабелів супроводжується появою і зростанням з часом рівня ЧР.

Роботи [25, 26] присвячені розробці інтелектуальних сенсорів, які реалізують on-line моніторинг ЧР у високовольтних кабелях для Smart Grids. Такі сенсори здійснюють контроль стану ізоляції високовольтного устаткування та локалізацію місця пошкодження. Моніторинг ЧР у кабелях та їхніх муфтах у режимі on-line забезпечується також за допомогою надвисокочастотних сенсорів UHF (ultra high frequency sensors) і акустичних датчиків [25, 26]. UHF-датчики працюють на надвисокій частоті – до 1500 МГц [27] і здатні ефективно фільтрувати будь-які сигнали коронного розряду [28].

Ряд робіт [26, 31–38], представлених на конференціях ICABLE'15 і ICABLE'19 (International Conference on Insulated Power Cables), пов'язані з удосконаленням методів моніторингу ЧР, діагностики стану кабелів, виявлення несправностей шляхом використання в них ВОМ. Крім діагностики силових кабелів, повідомляється про моніторинг стану муфт кабелів із ЗПЕ ізоляцією на середню і високу напруги за допомогою описаної вище системи DTS (distributed temperature sensing) та акустичної системи DAS (distributed acoustic sensing) [31, 32, 35].

Інтелектуальна система DAS (або iDAS згідно з [31]) дає змогу здійснювати розподілений акустичний моніторинг на відстані до 40–50 км. Принцип її роботи аналогічний описаному вище принципу дії системи DTS, але в акустичному датчику DAS (distributed acoustic sensor) аналізуються коливання інтенсивності розсіяного випромінювання, а не змінення спектра розсіювання, як у DTS датчику. За параметрами отриманих флуктуацій оцінюється джерело, що створило акустичну хвилю. Система DAS чутлива до змінення як температури, так і деформації. Вимірювання температури та

деформацій у системі DAS розділяються, оскільки "температурні" сигнали виникають у значно низькому частотному діапазоні, ніж під час реєстрації та вимірюванні деформації.

За допомогою технології DAS BOM здійснює контроль навколишнього простору і здатен підтримувати "свою безпеку". Для цього до оптичного модуля кабелю підключається електронний блок інтелектуальної розподіленої акустичної системи, яка проводить спектральний аналіз зовнішнього впливу (наприклад, у разі земляних робіт поблизу підземних кабелів), визначає місце потенційно негативного впливу, дозволяє забезпечити захист зовнішньої оболонки кабелю.

Система захисту Smart Cable Guard. На сьогоднішній день у багатьох мережах працює автоматизована система захисту кабелів середньої напруги Smart Cable Guard (SCG) [33, 37, 38, 39]. Структуру системи SCG у спрощеному вигляді показано на рис. 6 [37, 38].

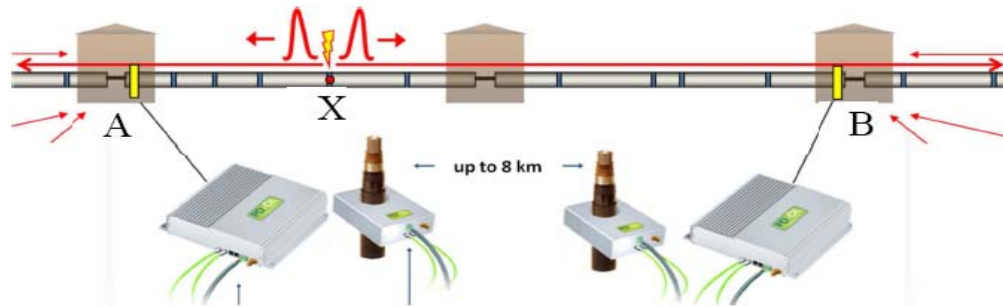


Рис. 6

SCG складається із спеціального бездротового промислового комп'ютера з інтернет-підключенням та індуктивних датчиків ЧР, розміщених у кабельній мережі, – один датчик у положенні *A*, інший – у положенні *B*, на відстані не більше 8 км один від одного (рис. 6).

Інтелектуальна система SCG здійснює моніторинг і визначення місця появи ЧР, а також дефектів і руйнацій у кабелях середньої напруги в режимі on-line (рис. 7) для того, щоб на виявленій аварійній ділянці вчасно усунути пошкодження кабелю або обрив оптичного волокна.

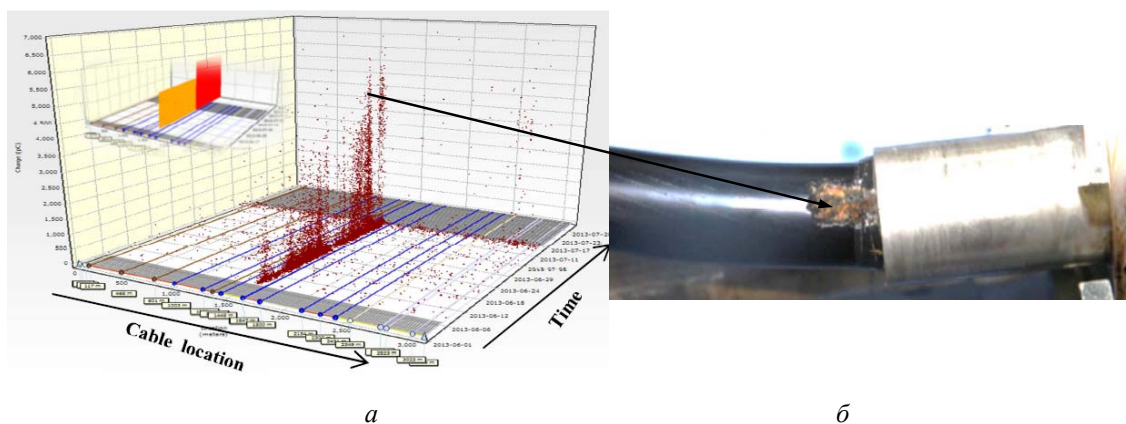


Рис. 7

Рис. 7, *a* представляє інтерфейс системи Smart Cable Guard з картою ЧР у функції часу (time) та довжини кабелю (cable location). Інтенсивність ЧР показана вздовж вертикальної осі. На вставці ліворуч – рівень ризику виникнення аварійних ситуацій у залежності від часу як результат роботи SCG системи. Виявлений відповідно до наведеної карти ЧР дефект з'єднувальної муфти, що виник через деградацію ізоляції в результаті іскріння між металевою трубою та екраном, показано на рис. 7, *б* [37].

Система захисту кабелів SCG має дві особливості [37]: знаходить несправності в режимі реального часу, в тому числі точно визначає місця пошкоджень; виявляє та контролює рівень ЧР і таким чином теж безпомилково визначає місця дефектів (рис. 7).

Інтелектуальна система SCG діє, наприклад, у Нідерландах, де проявила себе як точний та ефективний засіб для оперативного визначення місць пошкодження в кабелях середньої напруги [33].

На рис. 8 показано датчики системи SCG в електричному ланцюзі довжиною 12,4 км з трьома однофазними 10 кВ кабелями, які мають ЗПЕ ізоляцію [37]. Як повідомляється в [37], SCG система успішно працює на підстанції міста Хардервейк (Harderwijk) у Нідерландах, зокрема в грудні 2014 р.

система точно визначила місце несправності однієї з фаз кабельної лінії на відстані 6,9 км від підстанції [37].

Міжнародний сертифікаційний і класифікаційний центр DNV GL одним з останніх досягнень в області розвитку системи Smart Cable Guard визнав технології точного (з точністю до 1%) визначення місць несправностей у кабельних лініях середньої напруги та моніторингу часткових розрядів у кабелях в on-line режимі [37–41].

Інтелектуальні технологічні інновації для визначення характеристик кабельних трас. Крім зазначеного вище, ще одним інтелектуальним рішенням є використання електронних маркерів для підземних кабельних ліній електропередачі на низьку, середню та високу напруги. Вони характеризуються можливістю зчитування/запису в свою внутрішню пам'ять усієї інформації щодо лінії. Маркери здійснюють повне визначення кабельних трас, включаючи знаходження муфт, поворотів, перетинань з різними комунікаціями з точністю локалізації в межах 10–20 см [42].

Інтернет-ресурс guscable.lu в жовтні 2019 р. повідомив [43], що Prysmian Group пропонує нове інтелектуальне рішення Pry-ID, яке забезпечує доступ у режимі реального часу до основної інформації на кабелях і кабельній арматурі, що повністю визначає їхній статус. Доступ здійснюється на основі технології радіочастотної ідентифікації RFID (radio-frequency identification). За допомогою запропонованої технології точно визначається основна інформація про кабель, включаючи його тип, довжину, походження та компоненти, до яких він приєднаний. Smart-технологія Pry-ID безпомилково виявляє всі дані про кабель, сприяє скороченню часу прокладання і монтажу кабельної лінії, не вимагає використання зовнішніх джерел електроживлення, працює протягом усього терміну служби кабелю, навіть у самих складних умовах експлуатації [43].

Виробництво волоконно-оптичних кабелів (ВОК) в Україні. Найбільшими виробниками ВОК в Україні є заводи "Одескабель" та "Південкабель" (м. Харків). Харківський кабельний завод виготовляє широку гаму таких кабелів з 2004 р. і має проектну потужність виробничого цеху до 8000 км ВОК на рік [44]. Характеристики ВОК модульної конструкції представлено в [45], кількість оптичних волокон у них складає до 288 [45]. Наведені дані характеризують готовність кабельної промисловості України до випуску силових кабелів з волоконно-оптичними модулями, використання яких у кабельних лініях електропередачі надає можливості реалізовувати інтелектуальні технології моніторингу їхнього поточного технічного стану.

Наукові результати, отримані в Інституті електродинаміки (ІЕД) НАН України. В ІЕД НАН України під керівництвом д.т.н., професора Ніженського А.Д. створено наукову школу з розробки фазово-частотних методів підвищення точності вимірювання статичних і динамічних характеристик механічних ушкоджень в електротехнічному обладнанні з використанням лазерних далекомірних систем [46] та підвищення їхньої завадостійкості [47].

Методи, закладені в основу дії лазерних систем, створили наукове підґрунтя для розробки оптоелектронних інформаційно-вимірювальних систем, реалізації сучасних волоконно-оптичних інтелектуальних інформаційно-вимірювальних засобів для моніторингу в режимі реального часу технічного стану силових кабелів з інтегрованими ВОМ. Використання в таких системах нового алгоритму на основі оптичних комірок Бреґга підвищує точність визначення частотного максимуму вихідного сигналу волоконно-оптичних систем [48], зменшує похибку вимірювання фазово-частотних систем та надає можливості створювати просторово-розподілені системи вимірювання [49], в тому числі й точкового визначення температури [50], що є особливо актуальним під час здійснення моніторингу технічного стану сучасних силових кабелів з полімерною ізоляцією.

В ІЕД НАН України розроблено також метод і технічне рішення для реалізації альтернативної бездротової системи моніторингу стану кабельних ліній з використанням енергії їхнього електромагнітного поля. Створено експериментальний зразок такої системи та проведено її тестування в лабораторних умовах [51].

Основні висновки. Обґрунтовано, що у зв'язку з підвищенням вимог до якості електроенергії систем електропостачання виникла нагальна потреба впровадження інтелектуальних технологій моніторингу поточного технічного стану потужних кабельних ліній електропередачі.



Рис. 8

Показано, що в розвинених країнах світу під час реалізації такого типу технологій використовуються інтегровані в структуру кабелів волоконно-оптичні модулі (для передачі прямих і відбитих від ушкоджень імпульсів лазерного випромінювання) та оптоелектронні системи (для визначення та контролю змінення електромагнітних, температурних і механічних характеристик, а також інтенсивності часткових розрядів в ізоляційних структурах кабелів та їхніх з'єднувальних муфт).

Такі системи мають важливі переваги: малі габаритні розміри і вагу, простоту монтажу та обробки інформації, високу пропускну здатність і швидкість передачі інформації (на відстані до сотень кілометрів за незначного затухання сигналу), стійкість до перегріву та впливу агресивних середовищ, нечутливість до радіоперешкод, дії сильних електромагнітних полів та різних засобів екранування, а також відсутність негативного впливу на навколишнє середовище.

Засоби на основі волоконно-оптичних модулів є ефективними для використання в силових кабелях з метою надійного зв'язку між силовими підстанціями, захисту потужних ЛЕП від прямих ударів блискавок і аварійних коротких замикань. Завдяки таким системам, диспетчер може здійснювати поточний моніторинг технічного стану та динамічного навантаження кабельних ЛЕП, а в перспективі й їхнє інтелектуальне (smart) управління. У подальшому можливе створення глобальних систем, що поєднують інтернет-зв'язок, телекомунікації та інші види обміну інформацією зі швидкістю передачі даних до 10–100 Гбіт/с.

Представлено діючі в електромережах розвинених країн світу інтелектуальні системи: DTS-систему розподіленого вимірювання температури; DAS-систему розподіленого вимірювання акустичного сигналу; захисну систему Smart Cable Guard. Системи дають змогу на основі даних моніторингу здійснювати ефективне управління роботою кабельних ліній та забезпечувати їхню високу надійність у режимі реального часу.

Описані моніторингові засоби пропонується використовувати виробникам задля перевірки якості виготовленої кабельної продукції, а також експлуатуючим організаціям для контролю стану електричних кабелів.

Наукові результати ІЕД НАН України та готовність вітчизняних кабельних заводів України до серійного випуску кабельної продукції з інтегрованими волоконно-оптичними модулями і інформаційно-вимірювальними засобами створюють основу та реальну можливість задля розробки та технічної реалізації в найближчому часі інтелектуальних технологій моніторингу технічного стану високовольтних кабельних ліній в Україні.

Роботу виконано 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"), 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. Cherukupalli S., Anders G.J. Distributed fiber optic sensing and dynamic rating of power cables. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley-IEEE Press, October 1, 2019. 240 p.
2. Rajan G. Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015, 575 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18074>
3. Hartog A. An introduction to distributed optical fiber sensors. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017. 472 p.
4. Волоконно-оптические кабели. Завод "Южкабель", Украина. Харьков: Майдан, 28 с. URL: https://upk.zp.ua/cms_files/68/42/Optic.pdf (дата звернення 15.06.2021)
5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиетиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 9–15.
6. Дубицкий С., Коровкин Н., Бабков Е. Грозозащитный трос с оптическим волокном. Термическая стойкость к прямому удару молнии. *Новости Электротехники*. 2011. № 4 (70). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/70/07.php> (дата звернення 15.06.2021)
7. Mitchell B. The role of fiber optic cables in computer networking. June 28, 2019. URL: <https://www.lifewire.com/fiber-optic-cable-817874> (дата звернення 15.06.2021)
8. Руководство по сооружению, испытанию и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения. Харьков: Майдан, 2017. 64 с.
9. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Золотарев В.М. Стационарные и переходные процессы в электромеханической системе нанесения полимерной изоляции на жилу сверхвысоковольтных кабелей. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 101–102.
10. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Магнитное поле подземной кабельной линии 330 кВ и способы ее уменьшения. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>

11. Cho J., Kim J.H., Lee H.J., Kim J.Yo., Song I.K., Choi J.H. Development and improvement of an intelligent cable monitoring system for underground distribution networks using distributed temperature sensing. *Energies*. 2014. No 7. Pp. 1076–1094.
12. Казанина И.В., Хадыева А.Р. Эффективность применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с системой мониторинга. *Вестник электротехники*. 2013. № 4 (83). С. 80–86.
13. Ларин Ю.Т., Смирнов Ю.В., Гринштейн М.Л. Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля. *Кабель-news*. 2009. № 8. С. 48–53.
URL: http://kabel-news.ru/netcat_files/90/100/august_Primenenie_sistemy_temperaturnogo_monitoringa.pdf (дата звернення 15.06.2021)
14. Когут І.С. Вплив дефектів структури на конструкційне демпфування однонаправлено армованих волокнистих композитів. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2012. Т. 48. № 4. С. 46–52. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2012_48_4_8 (дата звернення 15.06.2021)
15. Мокански В. Силовой кабель высокого напряжения со встроеным волоконно-оптическим модулем. *Кабели и провода*. 2009. № 2 (315). С. 14–17.
16. Wey A.H., Grotenhuis B.J., Kerstens A. Fibre-optical technology in medium-voltage XLPE cables in the Netherlands. International Conference on *Electricity Distribution* (CIRED 1999). URL: http://www.cired.net/publications/cired1999/papers/1/1_p11.pdf (дата звернення 15.06.2021)
17. Su Q., Li H.J., Tan K.C. Hotspot location and mitigation for underground power cables. *IEEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*. November 2005. Vol. 152. No 6. Pp. 934–938.
18. Дмитриев М.В., Илюшин П.В. О повышении эффективности применения систем мониторинга температуры кабельных линий напряжением 100–500 кВ. *Релейная защита и автоматизация*. 2018. С. 54–61 URL: http://mvdv.ru/wp-content/uploads/2018/02/Dmitriev_RZA1.pdf (дата звернення 15.06.2021)
19. Удовиченко О.В. Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. *Доклады Третьей научно-практической конференции: Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс*, Новосибирск. 2008. С. 301–304.
20. 60–500 kV high voltage underground power cables. XLPE insulated cables. *Nexans*, Edition 10.2011, 33 p. URL: https://www.nexans.com/Corporate/2013/60-500_kV_High_Voltage_full_BD2.pdf (дата звернення 15.06.2021)
21. XLPE land cable systems. *ABB*. 2010. Rev. 5. 28 p. URL: <https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE%20Land%20Cable%20Systems%20GM5007GB%20rev%205.pdf> (дата звернення 15.06.2021)
22. Подводные кабели. URL: <http://www.tkd-kabel.in.ua/news/25-podvodnyi-kabel> (дата звернення 15.06.2021)
23. DITEST STA-R series fiber optic distributed temperature & strain monitoring system. Omnisens, ref: DT-DITEST-STAR-eng, 4 p.
24. European technology platform Smart Grids. Strategic research agenda for Europe’s electricity networks of the future. Smart Grids Strategic Research Agenda 2035. March, 2012, 74 p. URL: <https://www.ctip-snet.eu/wp-content/uploads/2017/04/sra2035.pdf> (дата звернення 15.06.2021)
25. Ambikairajah R., Phung B.T., Ravishankar J., Blackburn T.R., Liu Z. Smart sensors and online condition monitoring of high voltage cables for the Smart Grid. Proceedings of the 14th International *Middle East Power Systems Conference* (MEPCON’10). Cairo, Egypt, December 19–21, 2010. Paper ID 289. Pp. 807–811.
26. Koltunowicz W., Badicu L., Hummel R., Broniecki U., Gebhardt D. PD testing and monitoring of HV cable systems. 9th International Conference on *Insulated Power Cables* (JICABLE’15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
27. Белковский С.В., Ботов С.В., Германенко Д.В., Русов В.А., Школьник А.Б. Оперативный контроль технического состояния высоковольтных кабельных линий. *Энергоэксперт*. 2015. № 3. С. 64–69. URL: <https://dimrus.com/manuals/cablesom.pdf> (дата звернення 15.06.2021)
28. Chengke Z., Huajie Y., Xiang D. Review of recent research towards power cable life cycle management. *High Voltage*. 2017. Vol. 2. Is. 3. Pp. 179–187.
29. Bawart M., Marzinotto M., Mazzanti G. Challenge of fault location on long submarine power cables. 9th International Conference *Insulated Power Cables* (JICABLE’15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
30. Schierig S., Bohme F., Pietsch R. An alternative approach about fault location on HVAC and HVDC cables during commissioning and operation. 9th International Conference *Insulated Power Cables* (JICABLE’15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
31. Conway C., Mondanos M. An introduction to fiber optic intelligent distributed acoustic sensing (iDAS) technology for power industry applications. 9th International Conference *Insulated Power Cables* (JICABLE’15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
32. Singh K., Minto C., Godfrey A. OptaSense distributed acoustic sensing (DAS) systems for the power network. 9th International Conference *Insulated Power Cables* (JICABLE’15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 4 p.

33. Wagenaars P., Steennis F., Broersma T., et al. Accurate on-line fault location (full breakdowns) for MV cables with Smart Cable Guard. 9th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 5 p.
34. Qian Y., Wagenaars P., Harmsen D., et al. Risk on failure, based on PD measurements in actual MV PILC and XLPE power cables. 9th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 3 p.
35. Kirkcaldy L., Pilgrim J., Rogers R., Lee S. G. Distributed acoustic sensing of partial discharge: initial findings. 10th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'19). Paris –Versailles, France, 23–27 June, 2019. 6 p.
36. Grund R., Hohloch J., Rogers R., Kammler A., Pohl C., Roland H. Integral sensing of HV cable joints – monitor operation and predict failures early. 10th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'15). Paris –Versailles, France, 23–27 June, 2019. 6 p.
37. Steennis F., Wagenaars P., Harmsen D., Minnen F., Broersma t., Huijkelom M., Bleeker P., Fijlstra H. Smart Cable Guard – a tool for on-line monitoring and location of PD's and faults in MV cables – its application and business case. 23rd International Conference on *Electricity Distribution* CIRED 2015. Lyon, 15–18 June 2015. Paper 1044. 5 p.
38. Steennis F., Buys P., Mehairjan R., Wielen P. Smart Cable Guard for PD-online monitoring of MV underground power cables in Stedin's network. International Conference on *Condition Monitoring and Diagnosis* CMD 2014. Jeju, South Korea, September 21-25, 2014. Pp. 525–528.
39. Smart Cable Guard. URL: <https://www.dnvgl.com> (дата звернення 15.06.2021)
40. Power cable diagnostics. URL: <https://www.dnvgl.com/services/power-cable-diagnostics-721> (дата звернення 15.06.2021).
41. Smart Cable Guard: the technology. URL: <https://www.dnv.com/power-renewables/services/scg/technology.html> (дата звернення 15.06.2021).
42. Рекомендации по маркировке кабельных линий (КЛ) электропередачи подземной прокладки с помощью электронных маркеров 3M™Scotchmark™ EMS. 8 с. URL: https://skomplekt.com/files/category_455/doc_c455_3.pdf (дата звернення 15.06.2021)
43. Prysmian Group предлагает новое интеллектуальное решение. URL: https://www.ruscable.ru/news/2019/10/08/Prysmian_Group_predlagaet_novoe_intellektualnoe_r/ (дата звернення 15.06.2021)
44. Золотарев В.М. Завод "Южкабель": вехи пути (75 лет заводу "Южкабель"). *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 5. С. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.02>
45. Кабели волоконно-оптические. Каталог завода "Южкабель". 42 с. URL: www.yuzhcable.com.ua (дата звернення 15.06.2021)
46. Брагинец И.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Применение фазово-частотного метода измерения расстояний в лазерной дальнометрии. *Технічна електродинаміка*. 2004. № 6. С. 56–59.
47. Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. Повышение помехоустойчивости фазовых лазерных дальномерных систем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 3. С. 91–96.
48. Zaitsev Ie., Shpylka A., Shpylka N. Output signal processing method for fiber bragg grating sensing system. Proceedings of the 15th International Conference on *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering* (TCSET-2020). Lviv-Slavske, Ukraine, February 25–29, 2020. Pp. 152–155. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235412>
49. Левицький А.С., Кобзарь К.О., Зайцев Є.О. Волоконно-оптичні вимірювачі зусиль в стяжних призмах турбогенераторів на основі решіток Бреґґа. *Гідроенергетика України*. 2017. № 3–4. С. 22–25.
50. Wang Q., Zhang L., Sun C., Yu Q. Multiplexed fiber-optic pressure and temperature sensor system for down-hole measurement. *IEEE Sensors Journal*. 2008. Vol. 8. Issue 11. Pp. 1879–1883. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.2006253>
51. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Система дистанційного моніторингу стану високовольтної кабельної лінії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 57. С. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.010>

INTELLECTUAL TECHNOLOGIES FOR MONITORING OF TECHNICAL STATE OF UP-TO-DATE HIGH-VOLTAGE CABLE POWER LINES

O.V. Kyrylenko, A.A. Shcherba, I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: sh1ch@ied.org.ua

The review concerning application of fiber-optic technologies in power industry, in particular, for monitoring of modern power cables with cross-linked polyethylene insulation and integrated fiber-optic module is carried out. The new intelligent tools for control of electrical, thermal and mechanical characteristics and partial discharges in power cable lines are presented. The current operational experience for the system of Smart Cable Guard in an emergency is described. The prospects to develop and use the intellectual technologies for monitoring of technical state of up-to-date high-voltage cable power lines and their operate reliability are grounded by analysis of new diagnostic methods controlling the level of partial discharges, temperature distribution and mechanical damage in polyethylene insulation and other elements of the high- and extra-high-voltage cables with integrated fiber-optic modules. References 51, figures 8.

Key words: high- and extra-high-voltage cables, integrated fiber-optic modules, monitoring of partial discharges, changes in temperature distribution and mechanical damages, intelligent diagnostics.

1. Cherukupalli S., Anders G.J. Distributed fiber optic sensing and dynamic rating of power cables. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley-IEEE Press, October 1, 2019. 240 p.
2. Rajan G. Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015, 575 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18074>
3. Hartog A. An introduction to distributed optical fiber sensors. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017. 472 p.
4. Fiber optic cables. Private joint stock company "Yuzhcable works", Ukraine. Kharkov: Majdan, 28 p. URL: https://upk.zp.ua/cms_files/68/42/Optic.pdf (accessed 15.06.2021) (Rus).
5. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Electromagnetic processes in 330 kv cable line with polyethylene insulation. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No 1. Pp. 9–15. (Rus).
6. Dubitskii S., Korovkin N., Babkov E. Overhead ground-wire cable with optic fiber. Thermal stability against direct lightning stroke. *Novosti Electrotekhniki*. 2011. No 4 (70). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/70/07.php> (accessed 15.06.2021) (Rus).
7. Mitchell B. The role of fiber optic cables in computer networking. June 28, 2019. URL: <https://www.lifewire.com/fiber-optic-cable-817874> (accessed 15.06.2021).
8. Work manual on laying, testing and operation of up-to-date extra-high-voltage cable lines. Kharkov: Majdan, 2017. 64 p. (Rus).
9. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Zolotarev V.M. Stationary and transient processes in electromechanical system for the application of polymeric on conductor of EHV cables. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 2. Pp. 101–102. (Rus)
10. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. The magnetic field of underground 330 kV cable line and ways for its reduction. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 3–9. DOI: https://doi.org/10.15407/techned_2019.05.003 (Rus)
11. Cho J., Kim J.H., Lee H.J., Kim J.Yo., Song I.K., Choi J.H. Development and improvement of an intelligent cable monitoring system for underground distribution networks using distributed temperature sensing. *Energies*. 2014. No 7. Pp. 1076–1094.
12. Kazanina I.V., Khadieva A.R. Efficiency of application of cable with cross-linked polyethylene insulation with monitoring system. *Vestnik elektrotekhniki*. 2013. No 4 (83). Pp. 80–86. (Rus)
13. Larin Yu.T., Smirnov Yu.V., Grinshtein M.L. Application of temperature monitoring system by optic cable for distribution temperature control along electric power cable. *Kabel-news*. 2009. No 8. Pp. 48–53. URL: http://kabel-news.ru/netcat_files/90/100/august_Primenenie_sistemy_temperaturnogo_monitoringa.pdf (accessed 15.06.2021) (Rus)
14. Kogut I.S. Effect of construction defects on structural damping of unidirectionally reinforced composites. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 2012. Vol. 48. No 4. Pp. 46–52. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2012_48_4_8 (accessed 15.06.2021). (Ukr)
15. Mokanski V. High-voltage power cable with integrated fiber-optic module. *Kabeli i provoda*. 2009. No 2 (315). Pp. 14–17. (Rus)
16. Wey A.H., Grotenhuis B.J., Kerstens A. Fibre-optical technology in medium-voltage XLPE cables in the Netherlands. *Proc. of the International Conference on Electricity Distribution, CIRED 1999*. URL: http://www.cired.net/publications/cired1999/papers/1/1_p11.pdf (accessed 15.06.2021)
17. Su Q., Li H.J., Tan K.C. Hotspot location and mitigation for underground power cables. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*. November 2005. Vol. 152. No 6. Pp. 934–938.
18. Dmitriev M.V., Ilyushin P.V. On improvement of efficiency of systems for temperature monitoring of 100–500 kV cable lines. *Releinaia zaschita i avtomatizatsiia*. March 2018. Pp. 54–61. URL: http://mvd.m.ru/wp-content/uploads/2018/02/Dmitriev_RZA1.pdf (accessed 15.06.2021) (Rus)
19. Udovichenko O.V. Temperature monitoring of high-voltage cable lines on the basis of cables with cross-linked polyethylene insulation. *Papers of the third science-practical conference: Power lines 2008: design, construction, operational experiment and science-technological advance*, Novosibirsk, 2008. Pp. 301–304. (Rus)
20. 60–500 kV high voltage underground power cables. XLPE insulated cables. *Nexans*, Edition 10.2011, 33 p. URL: https://www.nexans.com/Corporate/2013/60-500_kV_High_Voltage_full_BD2.pdf (accessed 15.06.2021)
21. XLPE land cable systems. *ABB*. 2010, Rev. 5, 28 p. URL: https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE%20Land%20Cable%20Systems%20GM5007_GB%20rev%205.pdf (accessed 15.06.2021)
22. Submarine cable. URL: <http://www.tkd-kabel.in.ua/news/25-podvodnyi-kabel> (accessed 15.06.2021)
23. DITEST STA-R series fiber optic distributed temperature & strain monitoring system. *Omnisens*, ref: DT-DITEST-STAR-eng, 4 p.
24. European technology platform Smart Grids. Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future. *Smart Grids Strategic Research Agenda 2035*. March, 2012. 74 p. URL: <https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2017/04/sra2035.pdf> (accessed 15.06.2021)
25. Ambikairajah R., Phung B.T., Ravishankar J., Blackburn T. R., Liu Z. Smart sensors and online condition monitoring of high voltage cables for the Smart Grid. *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10)*, December 19–21, 2010. Paper ID 289. Pp. 807–811.
26. Koltunowicz W., Badicu L., Hummel R., Broniecki U., Gebhardt D. PD testing and monitoring of HV cable systems. *9th International Conference on Insulated Power Cables (JICABLE'15)*. Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.

27. Belkovskii S.V., Botov S.V., Germanenko D.V., Rusov V.A., Shkolnik A.B. On-line control of technical state of high-voltage cable lines. *Energoekspert*. 2015. No 3. Pp. 64–69. URL: <https://dimrus.com/manuals/cablesom.pdf> (accessed 15.06.2021) (Rus)
28. Chengke Z., Huajie Y., Xiang D. Review of recent research towards power cable life cycle management. *High Voltage*. 2017. Vol. 2. Is. 3. Pp. 179–187.
29. Bawart M., Marzinotto M., Mazzanti G. Challenge of fault location on long submarine power cables. . 9th International Conference on *Insulated Power Cables* (JICABLE'15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
30. Schierig S., Bohme F., Pietsch R. An alternative approach about fault location on HVAC and HVDC cables during commissioning and operation. 9th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'15) Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
31. Conway C., Mondanos M. An introduction to fiber optic intelligent distributed acoustic sensing (iDAS) technology for power industry applications. 9th International Conference on *Insulated Power Cables* (JICABLE'15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
32. Singh K., Minto C., Godfrey A. OptaSense distributed acoustic sensing (DAS) systems for the power network. 9th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'15), Versailles, France, 21–25 June 2015. 4 p.
33. Wagenaars P., Steennis F., Broersma T., et al. Accurate on-line fault location (full breakdowns) for MV cables with Smart Cable Guard. 9th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 5 p.
34. Qian Y., Wagenaars P., Harmsen D., et al. Risk on failure, based on PD measurements in actual MV PILC and XLPE power cables. 9th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'15). Versailles, France, 21–25 June 2015. 3 p.
35. Kirkcaldy L., Pilgrim J., Rogers R., LeeS G. Distributed acoustic sensing of partial discharge: initial findings. 10th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'19). Paris –Versailles, France, 23–27 June. 2019. 6 p.
36. Grund R., Hohloch J., Rogers R., Kammler A., Pohl C., Roland H. Integral sensing of HV cable joints – monitor operation and predict failures early. 10th Int. Conf. *Insulated Power Cables* (JICABLE'19). Paris –Versailles, France, 23–27 June, 2019. 6 p.
37. Steennis F., Wagenaars P., Harmsen D., Minnen F., Broersma t., Huijkelom M., Bleeker P., Fijlstra H. Smart Cable Guard – a tool for on-line monitoring and location of PD's and faults in MV cables – its application and business case. 23rd International Conference on *Electricity Distribution*, CIRED 2015. Lyon, 15–18 June 2015. Paper 1044. 5 p.
38. Steennis F., Buys P., Mehairjan R., Wielen P. Smart Cable Guard for PD-online monitoring of MV underground power cables in Stedin's network. International Conference on *Condition Monitoring and Diagnosis* CMD 2014. Jeju, South Korea, September 21-25, 2014. Pp. 525–528.
39. Smart Cable Guard. URL: <https://www.dnvg.com> (accessed 15.06.2021)
40. Power cable diagnostics. URL: <https://www.dnvg.com/services/power-cable-diagnostics-7211> (accessed 15.06.2021)
41. Smart Cable Guard: the technology. URL: <https://www.dnv.com/power-renewables/services/scg/technology.html> (accessed 15.06.2021).
42. Recommendations for marking underground cable lines (CL) using 3M™ Scotchmark™ EMS electronic markers. 8 p. URL: https://skomplekt.com/files/category_455/doc_c455_3.pdf (Rus)
43. Prysmian Group offers a new intelligent solution. URL: https://www.ruscable.ru/news/2019/10/08/Prysmian_Group_predlagaet_novoe_intellektualynoe_r/ (accessed 15.06.2021) (Rus)
44. Zolotaryov V.M. Plant "Yuzhcable works": milestones of the road (75 years to Plant «Yuzhcable works»). *Electrotehnika i Elektromekhanika*. 2018. No 5. Pp. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.02> (Rus)
45. Fiber optic cables. Catalogue of Yuzhcable works PJSC, 42 p. URL: www.yuzhcable.com.ua (accessed 15.06.2021) (Rus)
46. Bragynets I.O., Kononenko O.G., Masjurenko Yu.O., Nizhenskyi A.D. Application of phase-and-frequency method for laser distance measurement. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2004. No 6. Pp. 56–59. (Rus)
47. Bragynets I.O., Zaitsev E.O., Kononenko O.G., Masjurenko Yu.O., Nizhenskyi A.D. Increasing the noise immunity of the phase laser ranging systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2014. No 3. Pp. 91–96. (Rus)
48. Zaitsev Ie., Shpylka A., Shpylka N. Output signal processing method for fiber bragg grating sensing system. Proceedings of the 15th International Conference on *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering* (TCSET-2020). Lviv-Slavske, Ukraine, February 25–29, 2020. Pp. 152–155. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235412>.
49. Levitskii A.C., Kobzar K.O., Zaitsev E.O. Fiber-optic force meters in the coupling prisms of turbogenerators based on Bragg gratings. *Hydroenergetika Ukrainy*. 2017. No 3–4. Pp. 22–25. (Ukr)
50. Wang Q., Zhang L., Sun C., Yu Q. Multiplexed fiber-optic pressure and temperature sensor system for down-hole measurement. *IEEE Sensors Journal*. 2008. Vol. 8. Issue 11. Pp. 1879–1883. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.2006253>
51. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. System for remote monitoring of high-voltage cable line state. *Pratsi Institutu elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2020. Is. 57. Pp. 10–14. DOI: https://doi.org/10.15407/publishing_2020.57.010 (Ukr)

Надійшла 16.06.2021

Остаточний варіант 22.07.2021