

**ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА**

УДК 621.315.2.016.2: 504.064.36

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.111>**СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СУЧАСНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

**І.М. Кучерява**, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [rB.irinan@gmail.com](mailto:rB.irinan@gmail.com)

*Представлено огляд волоконно-оптичних технологій для моніторингу в режимі реального часу технічного стану та експлуатаційних характеристик сучасних силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену та з інтегрованими в їхню структуру волоконно-оптичним модулем, зокрема, описано нові інтелектуальні засоби моніторингу температури, струму навантаження, деформації (механічних ушкоджень), рівня часткових розрядів в ізоляції, проникнення вологи всередину кабелів, контролю за обмеженням напруги їхньої зовнішньої оболонки. Показано перспективність використання та розвитку технологій інтелектуальної діагностики кабельних ліній задля досягнення ефективної і безпечної експлуатації кабелів та високої надійності мереж. Бібл. 47, рис. 7.*

**Ключові слова:** силові кабелі, кабельні лінії, зшита поліетиленова ізоляція, інтегровані волоконно-оптичні модулі, електричні мережі, інтелектуальний моніторинг.

**Попередні зауваження та обґрунтування актуальності роботи.** В останні десятиліття силові кабелі з полімерною ізоляцією, зокрема зшито-поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією, ефективно експлуатуються на промислових підприємствах, електростанціях, у великих містах зі значною щільністю навантаження та високим рівнем споживання електроенергії. Погіршення стану наявних кабельних ліній наростає протягом багатьох років роботи, і якщо не вживаються належні заходи щодо запобігання ризикам виходу з ладу, аварії з кабелями можуть бути неминучими.

Діагностичні випробування виправдовують себе після введення кабельних ліній в експлуатацію та періодичних ремонтних робіт. Істотне зниження аварійності роботи кабелів можливе завдяки провадженню сучасних систем безперервного моніторингу, які здатні контролювати стан ізоляції кабелів у реальному часі, виявляти на ранніх стадіях її дефекти, у такий спосіб оперативно запобігати можливим аварійним ситуаціям, до того ж забезпечувати тривалий термін служби кабелів через постійний контроль експлуатаційних характеристик. Системи безперервного моніторингу робочих характеристик кабельних ліній – це потужний інструмент обслуговування критично важливої енергетичної інфраструктури.

**Загальна характеристика роботи.** Мета цієї роботи полягає у вивченні й представленні узагальненої інформації щодо новітніх інтелектуальних технологій моніторингу кабельних ліній електропередачі. Робота виконана на основі огляду наявних наукових та науково-технічних джерел.

**Системи контролю кабельних ліній у складі Smart Grid.** Smart Grid являє собою перспективну інтегровану, саморегульовальну й самовідновлювану систему енергетичних об'єктів та обслуговчих структурних складових, призначену для розподілення, передавання та постачання електроенергії. У загальну структуру Smart Grid інтегруються комунікаційні та інформаційно-технологічні комплекси (рис. 1) [1, 2]. Засоби моніторингу, аналізу робочих даних та управління дають змогу досягати високої ефективності та надійності функціонування енергосистеми, довготривалої стабільної роботи її складових. Моніторинг у режимі реального часу ліній електропередачі, зокрема силових кабельних ліній та первинного обладнання, є важливим елементом у забезпеченні безперебійного постачання електроенергії до споживачів.

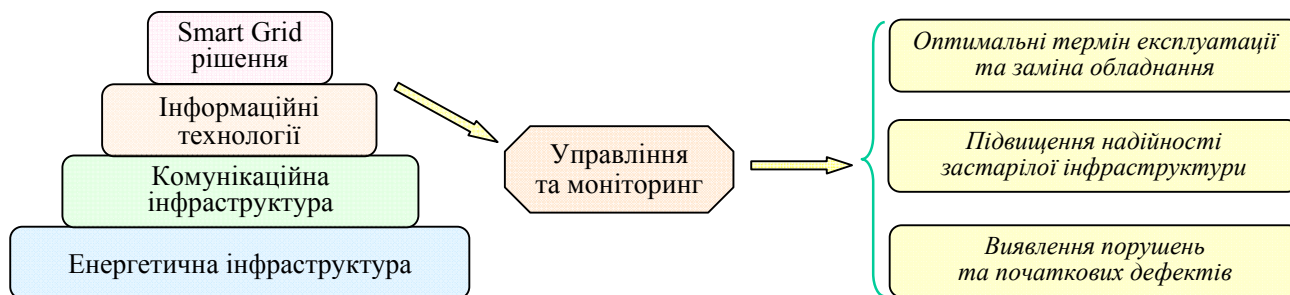


Рис. 1

Нині кабелі на високу та середню напругу складають важливу частину мереж розподілення та передачі електроенергії, зокрема Smart Grid. Моніторинг стану силових кабельних ліній у режимі реального часу є актуальною і комплексною задачею електроенергетики [1, 3–5], що насамперед пов'язано з різким зростанням споживання електроенергії в усьому світі, підвищеним попитом споживачів на високу надійність живлення, а також з достатньо довгою тривалістю експлуатації сучасного електрообладнання. З наближенням його до запланованого терміну служби знижується надійність електромереж.

Силові кабельні лінії, які довгочасно експлуатуються, є вузьким місцем у роботі електричних мереж, тому моніторинг, а особливо smart-моніторинг, відіграє вирішальну роль у забезпеченні їхнього належного функціонування. Саме системи smart-моніторингу обробляють дані для подальшого технічного обслуговування, експлуатації, планування в управлінні обладнанням мережі, генерують повідомлення-попередження в разі потенційної небезпеки для роботи обладнання. Smart-моніторинг надає важливу інформацію про вірогідні збої і поточний стан активних складових мережі в режимі реального часу.

Структуру Smart Grid з перевагами від управління та моніторингу її компонентів зображено на рис. 1 [1–3].

Складові системи контролю стану кабельних ліній у режимі реального часу як однієї з частин smart-моніторингу Smart Grid показано на рис. 2 [3].

Ураховуючи велику протяжність кабельних ліній (до десятків кілометрів), контроль експлуатаційних показників кабелів є складною задачею і потребує насамперед розподіленого моніторингу, тобто використання сучасних розподілених датчиків та спеціалізованих програмно-апаратних засобів для вимірювання та управління такими характеристиками, як струм, напруга, температура, вібрація, деформація тощо вздовж кабельної лінії у великій кількості її точок, окрім того здійснення цього на великих відстанях і з безперервними або періодичними (з невеликими інтервалами в часі) спостереженнями змінень характеристик.

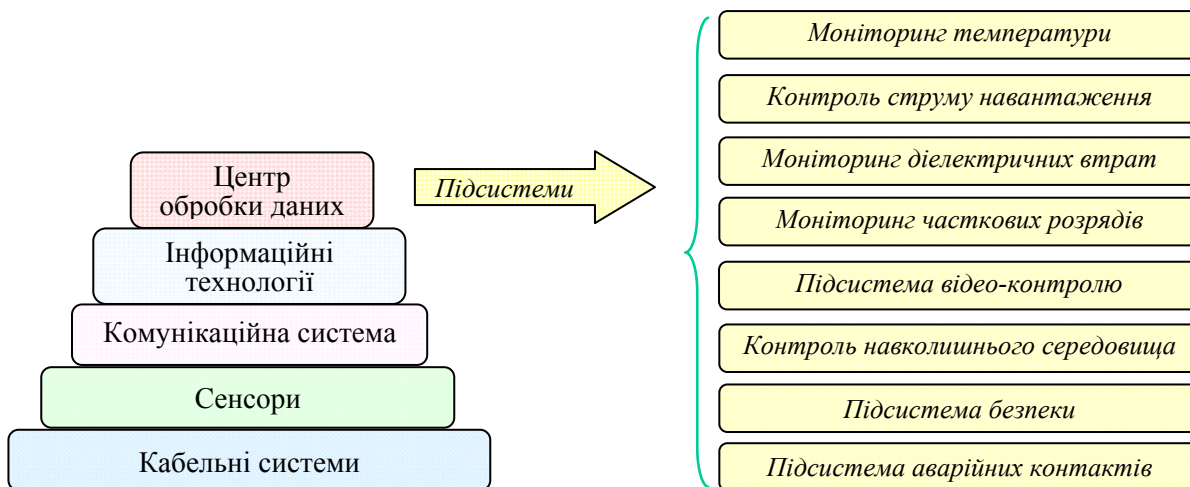


Рис. 2

Загалом для Smart Grid характерні децентралізований і багаторівневий контроль роботи усіх складових, реалізація систем запобігання відмовам та концепції самовідновлення.

**Волоконно-оптичні датчики** [2, 3, 5–10]. Моніторингові системи базуються на розподіленому вимірюванні експлуатаційних характеристик уздовж кабельних ліній, що можливо завдяки використанню волоконно-оптичної технології та сучасних вимірювальних засобів. Принцип роботи систем розподіленого вимірювання експлуатаційних характеристик силових кабелів (температури, струму, тиску, деформації тощо) відображено на рис. 3 [2, 8, 10].

Волоконно-оптичний модуль вбудовується в структуру силового кабелю на етапі виробництва або приєднується до нього ззовні вздовж нього. Під час волоконно-оптичного вимірювання кабель є лінійним датчиком, безперервним розподіленим чутливим елементом по всій довжині. Лазер у такому кабелі використовується

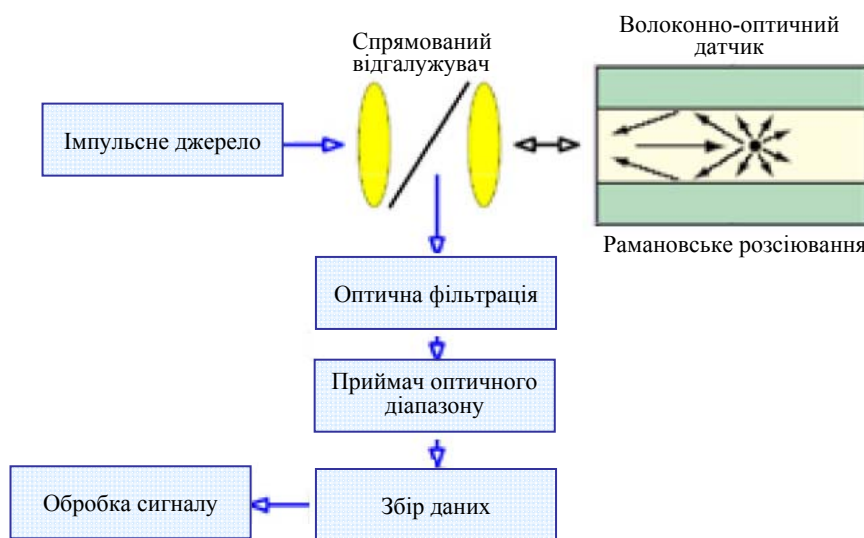


Рис. 3

для визначення місця зміння характеристик. Метод вимірювання ґрунтується на ефекті Рамана. Від лазерного джерела генерується лазерний імпульс, що характеризується зворотним розсіюванням у кожній точці кабелю з оптичним волокном. У разі зміння, наприклад, температури або механічних властивостей змінюється структура оптоволокна. Коли світло від лазера потрапляє в зону, наприклад, зміння температури або деформації, воно взаємодіє зі зміненою структурою волокна, і, крім прямого розсіювання світла, з'являється відбите світло. Спеціальна система обробки вимірює швидкість поширення й потужність як прямого, так і відбитого світла, і визначає місце й величину зміння температури або деформації. Значення таких характеристик значного набору (до тисячі) точок уздовж кабельної лінії визначаються за аналізом спектра зворотного розсіювання внаслідок залежності температури, тиску, деформації від затухання сигналу. Важливо, що оптичні волокна дають змогу передавати дані на великі відстані (десятьки кілометрів) з високою швидкістю.

Перевагами волоконно-оптичних датчиків є невеликі розміри й вага, простота монтажу, висока чутливість і швидкість реагування на зміння параметрів середовища, можливість одночасної реєстрації одним датчиком кількох параметрів, надійність, довготривала експлуатація, стійкість до хімічних впливів, агресивних речовин, дії сильних електромагнітних полів, засобів екранування, радіоперешкод, а також екологічність через відсутність негативного впливу на оточуюче середовище.

**Системи вимірювання температури DTS (distributed temperature sensing)** [3, 4, 10–16]. Волоконно-оптичні системи DTS широко використовуються в багатьох промислових, технічних та енергетичних напрямках, зокрема в силових кабельних лініях, на повітряних лініях електропередачі, у багатьох промислових процесах, наприклад, у системах пожежного оповіщення, контролю температури за хімічних процесів та ін. Завдяки оптичному волокну вони забезпечують вимірювання та постійний контроль температури, можливість обробки даних, що передаються до центру управління.

Сучасні DTS системи мають такі основні технічні характеристики [17]: максимальна довжина вимірювальної кабельної лінії – до 70 км; діапазон вимірювання – від  $-170$  до  $450^{\circ}\text{C}$ ; точність вимірювання – до  $1^{\circ}\text{C}$ ; робоча температура – від  $-10$  до  $60^{\circ}\text{C}$ ; кількість внутрішніх оптичних каналів – до 16; можливість одночасної реєстрації декількох параметрів (температури, електричних характеристик, деформації, акустичного фону); середній термін експлуатації – до 40 років.

DTS системи розподіленого вимірювання температури кабельних ліній дають змогу здійснювати:

- моніторинг температури кабелів у реальному часі по всій їхній довжині на відстані декількох десятків кілометрів;
- вимірювання температури на заданій ділянці по поверхні або об'єму кабелю;
- оцінку змінення температури в часі в локальних зонах; визначення місць виникнення та ступеня розвитку дефектів, що супроводжуються локальним перегрівом окремих ділянок кабелів; оперативне знаходження місць обривів кабельної лінії після незворотних дефектів або аварійних динамічних впливів на кабель;
- точне визначення зон перегріву (hot spots та bottlenecks);
- прогнозування терміну подальшої експлуатації кабелю;
- контроль стану кінцевих та з'єднувальних муфт;
- виявлення загоряння кабелів у замкнених кабельних спорудах (тунелях, каналах, лотках);
- сумісне функціонування з комплексними оптичними системами для визначення електричних параметрів різних режимів роботи кабельної лінії, її пожежної сигналізації і віброакустичного контролю.

Розподілений волоконно-оптичний датчик температури DTS – це ефективне рішення для моніторингу перевищення температури кабелів та їхнього займання, насамперед в закритих кабельних спорудах (тунелях, каналах).

Знання температурного профілю кабельної лінії дає змогу оптимізувати її навантаження за струмом, раціонально враховувати кліматичні умови та особливості місць прокладання.

Переваги smart-моніторингу за допомогою DTS систем виявляються в таких практичних можливостях для організацій, що експлуатують кабельні лінії: коректування в режимі реального часу пропускної здатності ліній у межах припустимих значень струмового навантаження; оптимізація потужності, що подається (за допомогою відповідного програмного забезпечення і впровадження системи автоматичного контролю потужності); оперативне реагування на виникнення перевантажень; зниження кількості системних аварій та перебоїв у енергопостачанні; контроль, виявлення резервів, прогнозування та управління роботою кабельних ліній на основі обробки даних моніторингу. Зазвичай, системи обробки моніторингових даних передбачають збір, аналіз і передачу даних, їхнього відображення у цифровому та графічному вигляді, архівування даних, формування звітів, оперативне планування подальших дій. Моніторингові системи за входними даними від DTS-датчиків реалізують такі функції: відображають у схематичному вигляді електромережу, проводять її аналіз; моделюють процеси в різних станах мережі; аналізують надійність її функціонування; планують дії щодо усунення можливих відмов і координації роботи захисних пристроїв.

Сучасні DTS системи розподіленого вимірювання температури функціонують у складі комплексної багатофункціональної системи smart-моніторингу кабелів, тобто, крім температурного профілю, визначають місця пошкоджень, несправностей, загоряння кабелів, можливість підвищення або необхідність зниження струму навантаження, надають оцінку терміну служби обладнання, а також визначають тиск, деформацію, акустичний сигнал.

Прикладом комплексної моніторингової системи є сучасна система RTTR (real time thermal rating), що призначена для кабелів на середню та високу напруги й компонентів мережі [18, 19] та заснована на розподіленому датчику температури DTS, розміщеному вздовж кабельної лінії. Ця система здатна відтворювати температуру в усіх точках уздовж лінії, визначати її гарячі точки або вузькі місця, допустимі перевантаження, що постійно розраховуються не лише з огляду на поточні умови роботи кабелів, але й за термічними перехідними процесами та термодинамічними характеристиками. RTTR система контролює змінення теплових характеристик навколишнього середовища (наприклад, швидкість висихання ґрунту навколо підземних кабелів). У реальному часі обчислюється температура струмопровідних жил кабелів, допустимий струм у стаціонарному режимі, прогноуються можливі перевантаження за потужністю (як в коротко-, так і в довгостроковій перспективі), розсіювання тепла

та потенційний перегрів різних ділянок кабельної лінії. Перевагами таких моніторингових систем є оптимальне використання потенціалу мережі, різке зниження ризиків перевантаження, інформація в реальному часі про роботу мережі.

На сьогодні в світі розроблено провідні інструкції, діють стандартні вимоги та процедури щодо вимірювання та обробки даних DTS моніторингу (наприклад, [20, 21]).

**Системи дистанційного коректування струму навантаження кабелів DCR (dynamic cable rating) у режимі реального часу** [22–24]. До основних технічних характеристик кабельних ліній відносяться теплові параметри, так як діапазон робочих температур і максимально допустима температура струмопровідних жил. За такими характеристиками визначається навантаження кабелів за струмом. Наприклад, тривала робоча температура на жилі кабелів із ЗПЕ ізоляцією не повинна перевищувати  $90^{\circ}\text{C}$ , допустима температура в режимі перевантаження становить  $130^{\circ}\text{C}$ ; відповідно до технічних умов нагрів кабельних систем в аварійних режимах повинен бути не вище  $80^{\circ}\text{C}$  впродовж не більше 8 годин за добу [25]. За таких умов температура є найбільш значущою для моніторингових систем DCR, які використовують дані системи DTS, що вимірює температуру жили кабелю з урахуванням його структури, теплових і електричних властивостей, факторів електричного впливу та умов навколишнього середовища.

Системи DCR працюють за схемою рис. 3, надсилаючи імпульс лазерного світла вздовж кабелю з волоконно-оптичним модулем та обробляючи зворотний сигнал, розсіяний від датчика. Вони визначають поточну пропускну здатність силового кабелю в реальному часі на основі теплових властивостей кабелю, температури навколишнього середовища, навантаження всього ланцюга та теплової моделі кабелю. Водночас використовуються різні моделі визначення струму навантаження: термоелектричні (thermal-electrical models), стаціонарні (steady state models) та динамічні (dynamic models) моделі з рекомендованими місцями розташування оптичного волокна в кабельних лініях різної конфігурації [23].

DCR системи поділяються на коротко- та довготривалі залежно від того, струми навантаження кабелю та умови навколишнього середовища призначаються (прогнозуються) ними протягом короткого (до доби) чи тривалого періоду часу [24].

Перевагами моніторингу струму навантаження кабелів за допомогою систем DCR є підвищення надійності енергосистеми та безпеки інфраструктури, можливість збільшення потужності, відстеження пікових навантажень кабелів і в мережі, подовження терміну служби кабельних ліній. Під час роботи в комбінації з DTS системою виявляються і контролюються гарячі точки на кабельній трасі, в центр управління сповіщається про пожежу, проводиться контроль вентиляції в замкнених кабельних спорудах. Системи DCR є привабливим рішенням для мережевих операторів, особливо для потенційних умов експлуатації кабельних ліній за високого рівня навантаження.

**Акустичні системи DAS (distributed acoustic sensing) для визначення деформації та температури** [26–30]. Розподілені оптично-волоконні системи акустичного зондування на основі розсіювання Релея використовують кабелі з волоконно-оптичним модулем для забезпечення розподіленого вимірювання деформації. Системи дуже чутливі також до коливань температури волокна, тому вимірювання можна проводити майже одночасно на всіх ділянках, тобто оптичні волокна можуть реагувати не тільки на температуру, але й на механічні змінення та порушення в структурі матеріалу кабелю.

Вимірювання температури та деформацій у системі DAS розділяються, оскільки "температурні" сигнали виникають у більш низькому діапазоні частоти, ніж у разі реєстрації та вимірювання деформації. На відміну від інших методів моніторингу, розподілене акустичне зондування здатне виявляти лише змінення температури, а не її абсолютне значення.

Інтелектуальна система DAS (або iDAS згідно з [26]) дає змогу здійснювати 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.

За допомогою технології DAS здійснюється також контроль навколишнього середовища для підтримки безпеки кабелю. Для цього до волоконно-оптичного модуля кабелю підключається спеціальний електронний блок, що проводить спектральний аналіз зовнішнього впливу (наприклад, у разі земляних робіт поблизу підземних кабелів), визначає місце потенційно негативної дії, чим реалізує моніторинг силових кабелів на наявність небажаних перешкод і несправностей кабелю, а також захист від механічних пошкоджень зовнішньої оболонки.

Моніторинг за технологією DAS дає змогу здійснювати інтелектуальне управління кабельними лініями. Інтерес до цього рішення мережевих операторів останнім часом все більш зростає [30].

**Вимірювання часткових розрядів для визначення дефектів в ізоляції кабелів** [9, 31–39]. Ефективний підхід до моніторингу стану ізоляції кабельних ліній (силових кабелів та кабельних муфт) під робочою напругою проводиться за оперативною реєстрацією та аналізом часткових розрядів (ЧР) з діагностикою дефектів ізоляції.

Виникнення ЧР є фактором зниження електричної міцності ізоляції та її поступового руйнування. ЧР являють собою локалізовані електричні розряди, що поширюються лише на частину ізоляційного проміжку, проте з часом призводять до фатальних пошкоджень ізоляції. Час від виникнення часткових розрядів до їхнього переходу в іскрові та дугові розряди (які спричиняють пробій ізоляції з подальшим відключенням обладнання) зазвичай достатній для прийняття обслуговуючим персоналом оперативних рішень щодо виявлення дефектів ізоляції на ранніх стадіях, відстеження її стану, необхідності ремонту з метою подовження служби кабельних ліній.

Перевагами систем моніторингу ЧР у кабельних лініях є висока чутливість діагностики до більшості дефектів в ізоляції; можливість визначення точної локалізації та типу виявлених дефектів, стадії їхнього розвитку та рівня небезпеки для подальшої експлуатації кабельної лінії; проведення оперативного визначення місця виникнення дефектів у режимі реального часу. До недоліків таких систем відносяться: високий рівень високочастотних імпульсних шумів у кабельних лініях, що ускладнює оцінку технічного стану та виявлення дефектів в ізоляції; використання спеціалізованих автоматизованих засобів оцінки стану ізоляції кабелів з урахуванням того, що сигнали ЧР є неперіодичними, перехідними за своєю природою, нерегулярними за своєю появою і мають форму затухаючих за експонентою імпульсів або затухаючих коливальних імпульсів короткої тривалості, яка може бути порядку наносекунд.

Традиційно вимірювання ЧР у кабелях і кабельних муфтах проводиться датчиками трьох типів, що працюють на різних діапазонах частот: ультразвукові і п'єзодатчики, високочастотні трансформатори струму і конденсатори зв'язку, надвисокочастотні електромагнітні антени. Практичні технології моніторингу ЧР за високочастотним (HF) струмом, метод ультрависокої частоти (UHF), або ультразвуковий (U) метод мають обмеження, вимагають використання великої кількості датчиків і спеціальних комунікаційних мереж для передачі даних. Тому сучасні технології розподіленого волоконно-оптичного моніторингу привертають все більш значну увагу для безперервного контролю ЧР завдяки перевагам у розподіленні датчиків уздовж усєї кабельної лінії, вимірюванні в реальному часі та стійкості до електромагнітних перешкод.

Smart-датчикам ЧР відводиться ключова роль у виявленні несправностей і самовідновленні роботи кабельних ліній, що експлуатуються в складі Smart Grid. У сучасних системах моніторингу сигнали ЧР відрізняються від шуму за такими характеристиками: тип шуму, його виникнення відносно положення фази живлення, а також смуга пропускання та характеристики затухання. Усунення шумів у сигналі ЧР проводиться з використанням, наприклад, методів фільтрації низьких частот, перетворення Вінгнера-Вілла, адаптивної фільтрації в частотній області, фільтрації з вирізками та узгодженням, а також методу на основі вейвлетів.

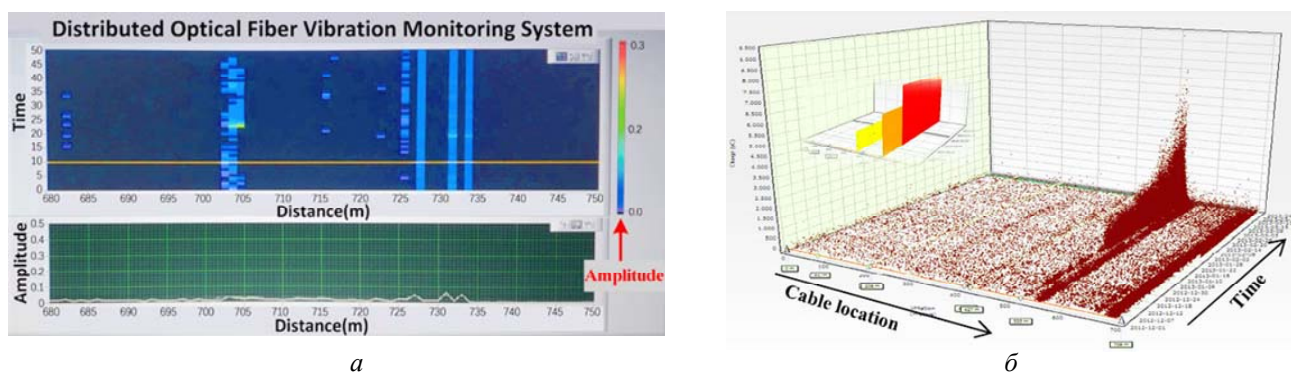


Рис. 4

Типові програмні інтерфейси систем розподіленого волоконно-оптичного моніторингу ЧР зображено на рис. 4. На рис. 4 *a* [36] показано зафіксовану системою моніторингу інтенсивність вібрації оптичного волокна (amplitude) у різних місцях уздовж кабельної траси (distance) і в різні моменти часу (time). Чим сильніша вібрація в цій точці, тим більше змінюється інтенсивність зворотного розсіювання і тим значніший розряд. Змінення інтенсивності розсіювання на відрізках з ЧР відрізняються від розсіювання без розрядів, так само як і спричинене різними дефектами ізоляції. У такій моніторинговій системі для контролю ЧР розраховується змінення характеристик зворотного розсіювання між двома вимірюваннями на основі деформації волокна. Рис. 4 *б* [39] ілюструє карту ЧР як функцію часу (time) і довжини кабелю (cable location), тут інтенсивність ЧР відображається за вертикальною віссю, а вставка ліворуч показує кольором ризик виникнення дефектів і руйнування ізоляції залежно від часу.

**Тестування кабелів з волоконно-оптичним модулем на проникнення води WPT (water penetration test) або WPM (water penetration measurement) [19].** Проникнення вологи всередину кабелів насамперед спричиняє з часом утворення та розвиток водних триїнгів в об'ємі ізоляції, її руйнування, вихід з ладу, а отже, збої в роботі кабельних ліній.

Інтелектуальні системи WPT призначаються для кабелів високої та середньої напруги, використовуються для визначення ризику їхнього збою через проникнення води та підвищення надійності. Високовольтний кабель, що має ЗПЕ ізоляцію, сегментовану жилу та вбудований WPT датчик, показано на рис. 5 [19].

Основною перевагою цього рішення є постійний контроль можливого проникнення води (навіть у невеликих кількостях) через оболонку і металеві елементи кабелю без необхідності переривання служби. Завдяки WPT системі підвищується надійність усієї мережі, відпадає необхідність періодичних контрольних випробувань зовнішньої оболонки кабелів, забезпечується високоточне визначення несправностей у разі виникнення надзвичайної ситуації, наприклад, пошкодження зовнішньої оболонки через будівельні роботи, і все це – в режимі реального часу.

**Системи для обмеження напруги зовнішньої оболонки кабелю SVL (sheath voltage limiter) [19, 40–42].** Зі швидким розвитком електросистеми в містах та на відповідальних енергетичних об'єктах частка високовольтних та надвисоковольтних кабельних ліній електропередачі в них все більш зростає. Під час удару блискавки, перемикання або несправності на оболонці кабелю може виникати висока напруга. Для її обмеження та захисту від перенапруги дорогих високовольтних кабелів під час перехідних процесів використовуються SVL пристрої.

На рис. 6 схематично показано SVL пристрій з обгорнутим навколо нього оптичним волокном. У разі чіткого відбитого сиг-



Рис. 5

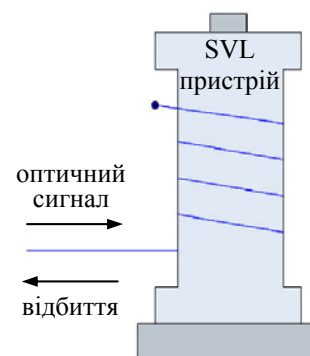


Рис. 6

налу SVL працює правильно, у разі втрати сигналу фіксується несправність пристрою. Системи моніторингу SVL постійно перевіряють стан тривоги і можуть видавати різні сигнали: часткова відмова SVL пристрою (наприклад, тривалий перегрів), повна відмова SVL, втрата цілісності оптоволокна. Така моніторингова система інтегрується з програмним забезпеченням, яке відстежує та записує відбиті оптичні сигнали та повідомляє про стан компонентів системи через графічний інтерфейс.

До переваг SVL моніторингу відносяться зменшення ризику перекриття компонентів, визначення невдалих SVL пристроїв та їхнього розташування, скорочення вимог щодо перевірок технічного стану кабельної системи, зменшення потреби спеціалістів у проведенні перевірок кабелів безпосередньо на місці їхнього прокладання.

**Наукові напрацювання Інституту електродинаміки НАН України [43–47].** Розроблено наукове підґрунтя щодо реалізації сучасних інтелектуальних інформаційно-вимірних засобів для моніторингу в реальному часі технічного стану та експлуатаційних характеристик силових кабелів з інтегрованим волоконно-оптичним модулем. Створено та випробувано експериментальний зразок альтернативної бездротової моніторингової системи стану кабельних ліній із використанням їхнього електромагнітного поля [43].

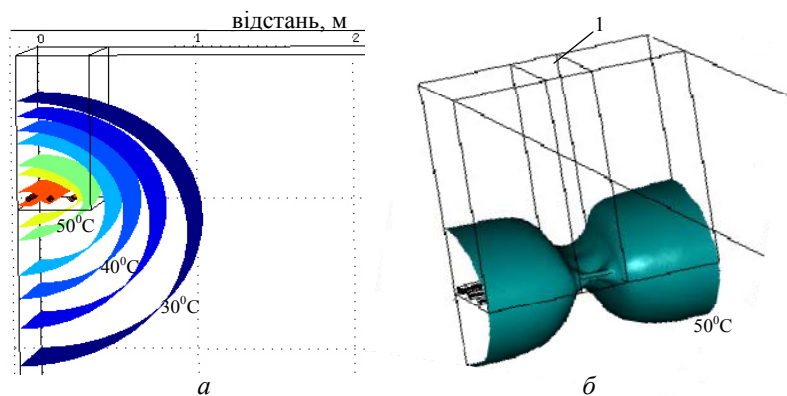


Рис. 7

Розроблено математичні моделі й комп'ютерні засоби для дво- та тривимірного моделювання електромагнітних і теплових процесів у кабельних лініях і навколишньому середовищі за різних способів прокладання кабелів [44]. Наприклад, розподіл температури навколо підземної трифазної кабельної лінії у вигляді ізотермічних поверхонь відображено на рис. 7 а, а ізотермічна поверхня, що відповідає 50<sup>0</sup> С, у разі неоднорідного ґрунту на ділянці 1

з більш високою теплопровідністю вздовж кабельної траси – на рис. 7 б. Такі дані свідчать про необхідність урахування залежності температури кабелів від навколишніх умов.

Досліджено вплив ЧР на електричні, теплові та імпульсні процеси розподілу густини струму в неоднорідному ізоляційному матеріалі силових кабелів [45–47].

**Висновки.** Проведено огляд та обґрунтовано доцільність використання в електромережах інтелектуальних систем моніторингу силових кабельних ліній на основі волоконно-оптичної технології, що дають змогу здійснювати ефективне управління роботою та забезпечувати високу надійність мереж у режимі реального часу, досягати безпечної експлуатації кабельних ліній, ефективно використовувати капіталовкладення.

Перевагами сучасних систем на основі волоконно-оптичної технології є здійснення контролю температури, струму, деформації, часткових розрядів, проникнення вологи, обмеження напруги зовнішньої оболонки кабелю, а також проведення загального smart-моніторингу – виявлення резервів, контроль, управління роботою кабельних ліній, підвищення їхньої надійності, захист від аварійно небезпечних ситуацій, прогнозування терміну експлуатації, надання інформації в реальному часі про роботу мережі і необхідність своєчасної заміни обладнання.

*Роботу виконано за НДР «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENSTO-E» (шифр "Режим 2") і частково за темою «Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу» (шифр "Елрес", Державний реєстраційний номер: 0123U100693), КПКВК 6541030.*



1. 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.
2. Dong X., Jing X., Qian K., Jiang W., Zhou C., Peng X. A smart grid needs smart monitoring. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2013., Vol. 2. No. 3. Pp. 321–328.
3. 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 (2). Pp. 1076–1094. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7021076>
4. 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.
5. Кириленко О.В., Щерба А.А., Кучерява І.М. Інтелектуальні технології моніторингу технічного стану сучасних високовольтних кабельних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 6. С. 29–40. <https://doi.org/10.15407/techmed2021.06.029>
6. 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.
7. Hartog A. An introduction to distributed optical fiber sensors, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017.
8. Barrias A., Casas J.R., Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors*. 2016. Vol. 16(5). 748. 35 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16050748> <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748>
9. Chai Q., Luo Ya., Ren J., Zhang J., Yang J., Yuan L., Peng G-D. Review on fiber-optic sensing in health monitoring of power grids. *Optical Engineering*, July 2019. Vol. 58(7). .p. 072007-1– 072007-20 (20 p.). DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.7.072007>.
10. Мокански В. Силовий кабель високого напруги со встроєним волоконно-оптичним модулем. 2009. № 2 (315). С. 14–17.
11. Ukil A., Braendle H., Krippner P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications. *IEEE Sensors Journal*, 2012. No. 12(5). Pp. 885–892, DOI: [10.1109/JSEN.2011.2162060](https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2162060)
12. Dawei C., Dongxu Z., Miao Yu. Research on on-line temperature monitoring system of power cable. *Advances in Engineering Research*, 2017. Vol. 123. Pp. 391–394.
13. Chen K., Yue Yi, Tang Yu. Research on temperature monitoring method of cable on 10 kv railway power transmission lines based on distributed temperature sensor. *Energies*, 21 Jun 2021. Vol. 14 (12). Pp. 3705 DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123705> – <https://www.mdpi.com/journal/energies>
14. 380 kV Underground Power Line Monitoring. Brugg, Switzerland, 2021. Ed. 01 2021.02.05. 2 p. URL: [https://www.apsensing.com/fileadmin/001\\_PORTAL\\_/001\\_documents/Success\\_Stories/Success\\_Stories\\_Power\\_Cable/Brugg\\_Cable-2021-02-05.pdf](https://www.apsensing.com/fileadmin/001_PORTAL_/001_documents/Success_Stories/Success_Stories_Power_Cable/Brugg_Cable-2021-02-05.pdf)
15. Кучерява І.М. Волоконно-оптичний моніторинг температури кабельних ліній енергетичного призначення. *Гідроенергетика України*. 2020. № 3–4. С. 28–32.
16. Grund R., Hohloch J., Rogers R., Kammler A., Pohl C., Roland H. Integral sensing of HV cable joints – monitor operation and predict failures early. *JICABLE'19, 10th Int. Conf. Insulated Power Cables*, Paris – Versailles, France, 23–27 June, 2019. 6 p.
17. Системи контролю температури кабельних ліній LIOS sensing. URL: <https://lios.lunainc.com/product-category/pre-vent/> <https://lios.lunainc.com/product/lios-pre-vent-long-range-industrial-temperature-monitoring-system/>
18. *Realise-grid*: research, methodologies and technologies for the effective development of pan-European key GRID infrastructures to support the achievement of a reliable, competitive and sustainable electricity supply. Project no. 219123. – D1.1.2. Description of the "smart" (advance monitored) cable system and of its laboratory prototype. Prysmian Powerlink. June, 2011. 50 p.
19. Smart Grid Solutions. Prysmian Group. 16 p. URL: [https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/smartgrid\\_FINAL\\_LOW.pdf](https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/smartgrid_FINAL_LOW.pdf)
20. International standard IEC 61757-2-2. Fibre optic sensors. Part 2-2: Temperature measurement. Distributed sensing, Edition 1.0, 05-2016, IEC, 2016. URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec61757-2-2%7Bed1.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61757-2-2%7Bed1.0%7Den.pdf)
21. IEEE Guide for temperature monitoring of cable systems (1718–2012). Publisher: IEEE, 8 June 2012. Electronic ISBN: 978-0-7381-7233-0. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6214562>
22. 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.
23. Kazerooni A., Scott C., Ruthven D., Peat W., Hessel E. Technical recommendations for implementation of dynamic cable rating system – cable modeling. *CIREC 2019 Conference, 25th International Conference on Electricity Distribution*, Madrid, 3-6 June 2019. Paper no. 2167. 5 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.34890/982> <https://www.cired-repository.org/handle/20.500.12455/757>
24. Enescu D., Colella P., Russo A., Porumb R.F., Seritan G.C. Concepts and methods to assess the dynamic thermal rating of underground power cables. *Energies*, 2021. 14. 2591. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092591> – <https://www.mdpi.com/journal/energies>

25. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. М.: Папирус-Про, 2004. Том 3. 688 с. М.: Папирус-Про, 2005. Том 4. 640 с.
26. Conway C., Mondanos M. An introduction to fiber optic intelligent distributed acoustic sensing (iDAS) technology for power industry applications. *JICABLE'15, 9th Int. Conf. Insulated Power Cables*, Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
27. Singh K., Minto C., Godfrey A. OptaSense distributed acoustic sensing (DAS) systems for the power network. *JICABLE'15, 9th Int. Conf. Insulated Power Cables*, Versailles, France, 21–25 June 2015. 4 p.
28. Olsen R., Steffansen S., Kristian Olesen K., Rogers R., Lees G. Fault localisation with distributed acoustic sensing (DAS) – service experience. *JICABLE'15, 10th Int. Conf. Insulated Power Cables*, France, Paris, Versailles 23–27 June, 2019. Paper E4-3. 6 p.
29. Cedilnik G., Lees G., Schmidt P.E., Herstrom S., Geisler T. Ultra-long reach fiber distributed acoustic sensing for power cable monitoring. *JICABLE'15, 10th Int. Conf. Insulated Power Cables*, France, Paris, Versailles 23–27 June, 2019. Paper E4-4. 5 p.
30. Distributed acoustic sensing (DAS) market: global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2022–2027. August 2022. 146 p. URL: [https://www.researchandmarkets.com/reports/5647922/distributed-acoustic-sensing-das-market-global?clid=CjwKCAjw\\_MqgBhAGEiwAnYOAel2oTbKNDd-tSPG8kHOykV99a\\_r3glxhJDtxdXTfjZo6zBLarNAEXRoC5QkQAvD\\_BwE](https://www.researchandmarkets.com/reports/5647922/distributed-acoustic-sensing-das-market-global?clid=CjwKCAjw_MqgBhAGEiwAnYOAel2oTbKNDd-tSPG8kHOykV99a_r3glxhJDtxdXTfjZo6zBLarNAEXRoC5QkQAvD_BwE)
31. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
32. Siebler D., Rohwetter P., Brusenbach R., Plath R. Optical-only detection of partial discharge with fluorescent polymer optical fiber sensors. *Procedia Engineering*, 2015. Vol.120. .Pp. 845 – 848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.711>
33. Hernandez-Mejia J.C., Perkel J. Partial discharge HV and EHV power cable systems. Chapter 8. National electric energy testing, research and application center (NEETRAC), 2016. Cable diagnostic focused initiative. 88 p. URL: [https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/8-HV-PD\\_15\\_with-Copyright.pdf](https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/8-HV-PD_15_with-Copyright.pdf)
34. 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 University, Egypt, December 19–21, 2010. Paper ID 289. Pp. 807–811.
35. High-voltage test techniques: partial discharge measurements. International Electrotechnical Commission (IEC) standard, 2000, IEC-60270 , URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec60270%7Bed3.0%7Ddb.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60270%7Bed3.0%7Ddb.pdf)
36. Pan W., Chen X., Zhao K. Cable-partial-discharge recognition based on a data-driven approach with optical-fiber vibration-monitoring signals. *Energies*, 2022. Vol.15. 5686. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155686>
37. Costa I.B., Weber G.H., Gomes D.F., Galvao J. R., Silva M.J., Pipa D.R., Ozcariz A., Zamarrero C.R., Martelli C., Silva J.C. Electric discharge detection and localization using a distributed optical fiber vibration sensor. *Optical Fiber Technology*, 2020. Vol. 58. 102266. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102266>
38. Yaacob M.M., Alsaedi M.A., Rashed J.R., Dakhil A.M., AtyaH S.F. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors. *Photonic Sensors*, 2014. Vol. 4(4). 325–337. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13320-014-0146-7>
39. Steennis F., Buys P, Mehairjan R., Wielen P. Smart Cable Guard for PD-online monitoring of MV underground power cables in Stedin's network. *Proceedings 2014 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Paris, France: Cigre, 2014. Pp. 525–528.
40. Dai C., Xuezhong L., Xianbo D. The suitability analyses of sheath voltage limiters for HV power cable transmission lines. *IEEE 2019 2nd International Conference On Electrical Materials And Power Equipment (ICEMPE)*, Guangzhou, China, 2019. Pp. 404–408. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMPE.2019.8727314>
41. Myung K.-S. Yoon H., Kim H.J., Jeong J.K., Jeong Y.-K., Choi Yu.-J. On-line diagnostic system for SVL device on under-ground power cables, *8th International Conference on Insulated Power Cables*, Jicable'11 19–23 June 2011, Versailles–France. Paper E.5.1.15 URL: [https://www.jicable.org/TOUT\\_JICABLE\\_FIRST\\_PAGE/2011/2011-E5-1-15\\_page1.pdf](https://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2011/2011-E5-1-15_page1.pdf)
42. Cable sheaths. Overvoltage protection. Application guidelines. 2020 Hitachi ABB Power Grids. 14 p. URL: [https://library.e.abb.com/public/42ff93fa18234d5982dad9bfc38482b7/ABB\\_AppNotes\\_3.1\\_Cable%20sheaths%20overvoltage%20protection%201HC0138880%20EN%20AA.pdf?x-sign=WjXTKUmYx6wAUy17Jk+Z0Fk7CrWWqkyWR0zKIX4c7V40B2s5nb7avAseEZssqm3](https://library.e.abb.com/public/42ff93fa18234d5982dad9bfc38482b7/ABB_AppNotes_3.1_Cable%20sheaths%20overvoltage%20protection%201HC0138880%20EN%20AA.pdf?x-sign=WjXTKUmYx6wAUy17Jk+Z0Fk7CrWWqkyWR0zKIX4c7V40B2s5nb7avAseEZssqm3)
43. Кириленко О.В., Щерба А.А., Золотарьев В.М., Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Пристрій для дистанційного моніторингу стану високовольтної кабельної лінії. Патент на корисну модель UA 147044, опубліковано 07.04.2021, бюл. № 14.
44. Подольцев А.Д., Кучерява І.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ін-т електродинамики НАН України, 2015. 305 с.
45. Золотарев В.М., Щерба А.А., Подольцев А.Д. Анализ высокочастотных процессов в кабеле на напряжение 330 кВ с сегментированной жилой при возникновении частичных разрядов в его изоляции. *Техн. Електродинамік.*, 2010. № 2. С. 3–10.
46. Кучерява І.Н. Исследование распределения электрического и теплового полей в неоднородном полиетиленовом диэлектрике при частичном разряде. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2013. Т. 1. № 8 (114). С. 89–93.

47. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Золотарев В.М. Импульсный ток в полиэтиленовой изоляции с воздушным включением при возникновении частичного разряда. *Техн. Електродинамік*, 2009. № 2. С. 7–12.

## MONITORING SYSTEMS FOR MODERN POWER CABLE LINES

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, Ukraine

e-mail: [rB.irinan@gmail.com](mailto:rB.irinan@gmail.com)

*The overview of fiber-optic technologies for real-time monitoring of the technical condition and operational characteristics of modern power cables with cross-linked polyethylene insulation and with the fiber-optic module integrated into their structure is presented. In particular, the new intelligent means for monitoring of the temperature, load current, deformation (mechanical damages), partial discharges in the insulation, moisture penetration inside the cables and control over sheath voltage limitation are described. The topicality of using and developing the technologies of smart diagnostics for power cable lines in order to achieve the effective and safe operation of cables as well as the high reliability of networks is shown. Ref. 47, fig. 7.*

**Key words:** power cables, power cable lines, cross-linked polyethylene insulation, integrated fiber-optic modules, power networks, smart monitoring.

1. 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.
2. Dong X., Jing X., Qian K., Jiang W., Zhou C., Peng X. A smart grid needs smart monitoring. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2013. Vol. 2. No. 3. Pp. 321–328.
3. 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 (2). Pp. 1076–1094. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7021076>
4. 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.
5. Kyrylenko O.V., Shcherba A.A., Kucheriava I.M. Intellectual technologies for monitoring of technical state of up-to-date high-voltage cable power lines. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No. 6. Pp. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.06.029> (Ukr.)
6. 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.
7. Hartog A. An introduction to distributed optical fiber sensors, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017.
8. Barrias A., Casas J.R., Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors* 2016, vol. 16(5), 748, 35 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16050748> <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/748>
9. Chai Q., Luo Ya., Ren J., Zhang J., Yang J., Yuan L., Peng G-D. Review on fiber-optic sensing in health monitoring of power grids. *Optical Engineering*, July 2019. Vol. 58(7). Pp. 072007-1– 072007-20 (20 p.). DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.7.072007>.
10. Mokanski V. High-voltage power cable with integrated fiber-optic module. *Kabeli i provoda*. 2009. No. 2 (315). Pp. 14–17. (Rus)
11. Ukil A., Braendle H., Krippner P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications. *IEEE Sensors Journal*, 2012. No. 12(5). Pp. 885–892. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2162060>
12. Dawei C., Dongxu Z., Miao Yu. Research on on-line temperature monitoring system of power cable. *Advances in Engineering Research*, 2017. Vol. 123. Pp. 391–394.
13. Chen K., Yue Yi, Tang Yu. Research on temperature monitoring method of cable on 10 kv railway power transmission lines based on distributed temperature sensor. *Energies*, 21 Jun 2021. Vol. 14 (12). Pp. 3705 DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123705> – <https://www.mdpi.com/journal/energies>
14. 380 kV Underground Power Line Monitoring. Brugg, Switzerland, 2021. Ed. 01 2021.02.05. 2 p. URL: [https://www.apsensing.com/fileadmin/001\\_PORTAL\\_/001\\_documents/Success\\_Stories/Success\\_Stories\\_Power\\_Cable/Brugg\\_Cable-2021-02-05.pdf](https://www.apsensing.com/fileadmin/001_PORTAL_/001_documents/Success_Stories/Success_Stories_Power_Cable/Brugg_Cable-2021-02-05.pdf)
15. Kucheriava I.M. Fiber optic monitoring of power cable line temperature. *Gidroenergetika Ukrainy*. 2020. No. 3–4. Pp. 28–32. (Rus)
16. Grund R., Hohloch J., Rogers R., Kammler A., Pohl C., Roland H. Integral sensing of HV cable joints – monitor operation and predict failures early. *JICABLE'19, 10th Int. Conf. Insulated Power Cables*, Paris – Versailles, France, 23–27 June, 2019. 6 p.
17. LIOS sensing systems for temperature control of power cable lines. URL: <https://lios.lunainc.com/product-category/pre-vent/> <https://lios.lunainc.com/product/lios-pre-vent-long-range-industrial-temperature-monitoring-system/>
18. *Realise-grid*: research, methodologies and technologies for the effective development of pan-European key GRID infrastructures to support the achievement of a reliable, competitive and sustainable electricity supply. /

- Project no. 219123. – D1.1.2. Description of the "smart" (advance monitored) cable system and of its laboratory prototype. Prysmian Powerlink. June, 2011. 50 p.
19. Smart Grid Solutions. Prysmian Group. 16 p. URL: [https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/smartgrid\\_FINAL\\_LOW.pdf](https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/smartgrid_FINAL_LOW.pdf)
  20. International standard IEC 61757-2-2. Fibre optic sensors. Part 2-2: Temperature measurement. Distributed sensing. Edition 1.0. 05-2016. IEC. 2016. URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec61757-2-2%7Bed1.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61757-2-2%7Bed1.0%7Den.pdf)
  21. IEEE Guide for temperature monitoring of cable systems (1718–2012). Publisher: IEEE, 8 June 2012, Electronic ISBN: 978-0-7381-7233-0. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6214562>
  22. 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.
  23. Kazerooni A., Scott C., Ruthven D., Peat W., Hessel E. Technical recommendations for implementation of dynamic cable rating system – cable modeling. *CIREED 2019 Conference, 25th International Conference on Electricity Distribution*, Madrid, 3-6 June 2019. Paper no. 2167. 5 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.34890/982> <https://www.cired-repository.org/handle/20.500.12455/757>
  24. Enescu D., Colella P., Russo A., Porumb R.F., Seritan G.C. Concepts and methods to assess the dynamic thermal rating of underground power cables. *Energies*. 2021. 14. 2591. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092591> – <https://www.mdpi.com/journal/energies>
  25. Makarov E.F. Handbook on the 4–35 kV and 110–1150 kV power networks / Ed. by I.T. Goryunov. A.A. Lyubimov. Moskva: Papyrus-Pro, 2004. Vol. 3. 688 p.; Papyrus-Pro. 2005. Vol. 4. 640 p. (Rus).
  26. Conway C., Mondanos M. An introduction to fiber optic intelligent distributed acoustic sensing (iDAS) technology for power industry applications. *JICABLE'15, 9th Int. Conf. Insulated Power Cables*, Versailles, France, 21–25 June 2015. 6 p.
  27. Singh K., Minto C., Godfrey A. OptaSense distributed acoustic sensing (DAS) systems for the power network. *JICABLE'15, 9th Int. Conf. Insulated Power Cables*, Versailles, France, 21–25 June 2015. 4 p.
  28. Olsen R., Steffansen S., Kristian Olesen K., Rogers R., Lees G. Fault localisation with distributed acoustic sensing (DAS) – service experience. *JICABLE'15, 10th Int. Conf. Insulated Power Cables*, France, Paris, Versailles 23–27 June, 2019. Paper E4-3. 6 p.
  29. Cedilnik G., Lees G., Schmidt P.E., Herstrom S., Geisler T. Ultra-long reach fiber distributed acoustic sensing for power cable monitoring. *JICABLE'15, 10th Int. Conf. Insulated Power Cables*, France, Paris, Versailles 23–27 June, 2019. Paper E4-4. 5 p.
  30. Distributed acoustic sensing (DAS) market: global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2022-2027. August 2022. 146 p. URL: [https://www.researchandmarkets.com/reports/5647922/distributed-acoustic-sensing-das-market-global?clid=CjwKCAjw\\_MqgBhAGEiwAnYOAel2oTBkNDD-tSPG8kHOYkV99a\\_r3glxhJDtxdXTfjZo6zBLarNAEXRoC5QkQAvD\\_BwE](https://www.researchandmarkets.com/reports/5647922/distributed-acoustic-sensing-das-market-global?clid=CjwKCAjw_MqgBhAGEiwAnYOAel2oTBkNDD-tSPG8kHOYkV99a_r3glxhJDtxdXTfjZo6zBLarNAEXRoC5QkQAvD_BwE)
  31. Kuchinskij G.S. Patial dascharges in high-voltage constructions. Leningrad: Energiia, 1979, 224 p.
  32. Siebler D., Rohwetter P., Brusenbach R., Plath R. Optical-only detection of partial discharge with fluorescent polymer optical fiber sensors. *Procedia Engineering*. 2015. Vol.120. Pp. 845–848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.711>
  33. Hernandez-Mejia J.C., Perkel J. Partial discharge HV and EHV power cable systems. Chapter 8. National electric energy testing, research and application center (NEETRAC), 2016. Cable diagnostic focused initiative. 88 p. URL: [https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/8-HV-PD\\_15\\_with-Copyright.pdf](https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/8-HV-PD_15_with-Copyright.pdf)
  34. 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 University, Egypt, December 19–21, 2010. Paper ID 289. Pp. 807–811.
  35. High-voltage test techniques: partial discharge measurements. International Electrotechnical Commission (IEC) standard, 2000. IEC-60270. URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec60270%7Bed3.0%7Ddb.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60270%7Bed3.0%7Ddb.pdf)
  36. Pan W., Chen X., Zhao K. Cable-partial-discharge recognition based on a data-driven approach with optical-fiber vibration-monitoring signals. *Energies*. 2022. Vol.15. 5686. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155686>
  37. Costa I.B., Weber G.H., Gomes D.F., Galvao J. R., Silva M.J., Pipa D.R., Ozcariz A., Zamarrero C.R., Martelli C., Silva J.C. Electric discharge detection and localization using a distributed optical fiber vibration sensor. *Optical Fiber Technology*. 2020. Vol. 58. 102266. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102266>
  38. Yaacob M.M., Alsaedi M.A., Rashed J.R., Dakhil A.M., AtyaH S.F. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors. *Photonic Sensors*. 2014. Vol. 4(4). Pp. 325–337. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13320-014-0146-7>
  39. Steennis F., Buys P, Mehairjan R., Wielen P. Smart Cable Guard for PD-online monitoring of MV underground power cables in Stedin's network. *Proceedings 2014 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Paris, France: Cigre, 2014. Pp. 525–528.
  40. Dai C., Xuezhong L., Xianbo D. The suitability analyses of sheath voltage limiters for HV power cable transmission lines. *IEEE 2019 2nd International Conference On Electrical Materials And Power Equipment (ICEMPE)*, Guangzhou, China, 2019. Pp. 404–408. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMPE.2019.8727314>
  41. Myung K.-S. Yoon H., Kim H.J., Jeong J.K., Jeong Y.-K., Choi Yu.-J. On-line diagnostic system for SVL device on under-ground power cables, *8th International Conference on Insulated Power Cables*. Jicable'11. 19–

- 23 June 2011, Versailles–France. Paper E.5.1.15. URL:  
[https://www.jicable.org/TOUT\\_JICABLE\\_FIRST\\_PAGE/2011/2011-E5-1-15\\_page1.pdf](https://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2011/2011-E5-1-15_page1.pdf)
42. Cable sheaths. Overvoltage protection. Application guidelines. 2020 Hitachi ABB Power Grids. 14 p. URL:  
[https://library.e.abb.com/public/42ff93fa18234d5982dad9bfc38482b7/ABB\\_AppNotes\\_3.1\\_Cable%20sheaths%20overvoltage%20protection%201HC0138880%20EN%20AA.pdf?x-sign=WjXTKUmyx6wAUy17Jk+Z0Fk7CrWWqkyWR0zKIX4c7V40B2s5nb7avAseEZssqm3](https://library.e.abb.com/public/42ff93fa18234d5982dad9bfc38482b7/ABB_AppNotes_3.1_Cable%20sheaths%20overvoltage%20protection%201HC0138880%20EN%20AA.pdf?x-sign=WjXTKUmyx6wAUy17Jk+Z0Fk7CrWWqkyWR0zKIX4c7V40B2s5nb7avAseEZssqm3)
43. Kyrylenko O.V., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Device for remote monitoring of the state of high-voltage cable line. Patent UA 147044, published on 07.04.2021, newsletter No. 14. (Ukr)
44. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015. 305 p. (Rus)
45. Zolotarev V.M., Shcherba A.A., Podoltsev O.D. Analysis of high-frequency processes in 330 kV cable with Milliken conductor at partial discharges in insulation. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2010. No 2. Pp. 3–10. (Rus)
46. Kucheriava I.M. Distribution of electric and thermal fields in heterogeneous dielectric at partial discharge. *Energoberezhennye. Energetika. Energoaudit*. 2013. Vol. 1. No 8 (114). Pp. 89–93. (Rus)
47. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Zolotarev V.M. Pulse current in polyethylene insulation with air inclusion at partial discharge. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2009. No 2. Pp. 7–12. (Rus)

Надійшла: 31.07.2023

Прийнята: 11.09.2023

Submitted: 31.07.2023

Accepted: 11.09.2023