

*Д.П. МУКОСЕЄВ***ОБґРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛЬНО-БЛОКУВАЛЬНИХ КАБЕЛІВ**

У роботі розглянуто та узагальнено конструктивні особливості сигнально-блокувальних кабелів, що застосовуються в системах управління, сигналізації та автоматизації об'єктів критичної інфраструктури. Проаналізовано основні варіанти конструктивного виконання таких кабелів, матеріали ізоляції та оболонки, а також сучасні підходи до забезпечення їх пожежної безпеки відповідно до чинних європейських норм і стандартів. Особливу увагу приділено використанню безгалогенних полімерних компаундів та антипіренових домішок, їх впливу на вогнестійкість та електричні характеристики кабельної продукції. Розглянуто методи пожежних і електричних випробувань сигнально-блокувальних кабелів, зокрема випробування на поширення полум'я, димоутворення та корозійність продуктів згоряння. Показано, що застосування сучасних матеріалів і технологій дозволяє підвищити рівень пожежної безпеки кабелів без зниження їх експлуатаційної надійності. Отримані узагальнення можуть бути використані при проектуванні, виборі та експлуатації сигнально-блокувальних кабелів для підвищення надійності та живучості інфраструктурних систем, зокрема в умовах підвищених ризиків.

Ключові слова: сигнально-блокувальні кабелі, пожежна безпека, безгалогенні матеріали, конструкція кабелів, CPR, вогнестійкість, димоутворення, кабельні випробування, електрична міцність, старіння кабельної ізоляції.

*D. MUKOSIEIEV***RATIONALE FOR THE DESIGN AND APPLICATION FEATURES OF SIGNAL-BLOCKING CABLES**

The paper examines and generalizes the design features of signal-blocking cables used in control, signaling, and automation systems of critical infrastructure facilities. The main design variants of such cables, the materials used for insulation and sheathing, as well as current approaches to ensuring their fire safety in accordance with applicable European regulations and standards, are analyzed. Particular attention is paid to the use of halogen-free polymer compounds and flame-retardant additives, and to their effect on the fire-resistant and electrical characteristics of cable products. Methods of fire and electrical testing of signal-blocking cables are considered, including tests for flame propagation, smoke generation, and the corrosivity of combustion products. It is shown that the use of modern materials and technologies makes it possible to improve the fire safety level of cables without reducing their operational reliability. The obtained generalizations may be used in the design, selection, and operation of signal-blocking cables in order to improve the reliability and survivability of infrastructure systems, particularly under conditions of elevated risk.

Keywords: signal-blocking cables, fire safety, halogen-free materials, cable design, CPR, fire resistance, smoke generation, cable testing, dielectric strength, aging of cable insulation.

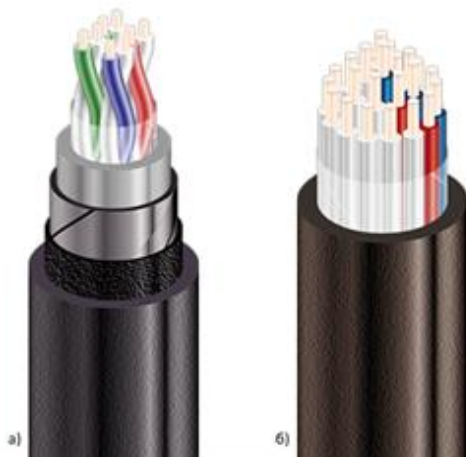
Вступ. Сигнально-блокувальні кабелі є важливим компонентом систем керування та автоматизації, які використовуються в залізничній, енергетичній і промисловій сферах. Їх основне призначення – передача командних сигналів, керування блокувальними механізмами та гарантування безпеки на об'єктах критичної інфраструктури. В умовах повномасштабної війни, закриття авіасполучення та зростання навантаження на критичну інфраструктуру роль залізничного транспорту в Україні істотно посилилася. Якщо у 2018 році поїздами далекого сполучення АТ «Укрзалізниця» було перевезено 55,9 млн пасажирів, а у 2019 році – 53,3 млн, то у 2020 році через пандемічні обмеження цей показник знизився до 16 млн. Уже у 2021 році обсяг перевезень відновився до понад 25 млн пасажирів. Після початку повномасштабного вторгнення у 2022 році залізниця фактично стала базовим видом міжміського сполучення в країні: за підсумками року у далекому сполученні було перевезено 17 млн пасажирів. У 2023 році пасажиропотік зріс до 25 млн, а за підсумками першого півріччя 2024 року – до 13,3 млн, що на 23% більше порівняно з аналогічним періодом попереднього року. У 2025 році в далекому сполученні було перевезено 28 млн пасажирів, тобто на 200 тис. більше, ніж роком раніше. У піковий літній сезон 2025 року попит на окремих напрямках перевищував пропозицію у 4–5 разів, а на найпопулярніших рейсах – у 5–8 разів, що додатково підтверджує зростання значення залізничного транспорту в умовах війни[7]. Це висуває підвищені вимоги до надійності та безвідмовності кабельних мереж сигналізації. Надійність кабелів набуває

особливої ваги й в енергетиці, де обстріли та аварії можуть вивести з ладу мережі живлення. Таким чином, актуальним є аналіз конструктивних особливостей сигнально-блокувальних кабелів з точки зору їхньої надійності та пожежної безпеки. У цій статті розглянуто будову таких кабелів, виклики забезпечення їх вогнестійкості (зокрема застосування антипіренов) та відповідність сучасним європейським нормам (ДСТУ EN 50575:2018, ДСТУ EN 60332-1-2:2017, ДСТУ EN 50399:2016 та ін.). Описано сучасні матеріали і методи випробувань, наведено результати досліджень щодо підвищення вогнестійкості кабельної продукції. Особливо підкреслено актуальність теми для підвищення надійності інфраструктури у воєнний час.

Конструктивні особливості сигнально-блокувальних кабелів. Сигнально-блокувальні кабелі (СБ кабелі) призначені для кіл залізничної сигналізації, централізації та блокування, а також для інших систем зв'язку й автоматики. Як правило, вони розраховані на відносно низьку напругу керування – наприклад, типові кабелі цього класу працюють при номінальній змінній напрузі до ~380 В або постійній 700 В. Конструкція СБ кабелів характеризується множинністю струмопровідних жил малого перерізу. Найчастіше струмопровідні жили виконані з монолітної мідної дротини діаметром близько 0,9–1,0 мм. Ізоляція кожної жили традиційно виготовляється з полімерного діелектрика, такого як поліетилен (ПЕ) чи інша полімерна композиція. Окремі ізольовані жили можуть скручуватися в пари для зменшення взаємних завад; кілька пар або ж окремих жил формують елементарні пучки,

обвигі міцною ниткою (капроною чи іншою) для надання формостабільності. Сердечник кабелю може складатися як безпосередньо з одиночних жил (типово 3–61 жил), так і з кількох пучків (наприклад, 3–30 пар) залежно від модифікації. Для вирівнювання форми сердечника використовується поясна ізоляція у вигляді обгортки стрічками (синтетичними або ПВХ). Зовнішня оболонка кабелю зазвичай виконується з термопластичного матеріалу і може мати багатошарову структуру. Наприклад, один із типових варіантів – подвійна оболонка: внутрішній шар із ПЕ або ПВХ-пластикату, а зовнішній – із світлостабілізованого поліетилену для захисту від УФ-випромінювання [6]. Існують різновиди конструкції із додатковими елементами – екраном (металевим або пластиковим), бронепокривом (сталеві стрічка чи дроти) – для захисту від електромагнітних або механічних впливів, залежно від умов експлуатації.

Варіативність конструкцій СБ кабелів дуже велика – виробники пропонують модифікації з різною кількістю жил, різним їхнім діаметром, схемою скручування та матеріалами оболонок. Проте незалежно від різновидів виконання, усі такі кабелі повинні відповідати строгим нормам надійності і безпеки. Зокрема, сучасні стандарти вимагають дотримання вимог пожежної безпеки для кабельної продукції цього типу.



а – типу СБПБ6Шп 4×2×1 з мідними жилами, поліетиленовою ізоляцією, в алюмінієвій оболонці, броньовані двома сталевими стрічками, у поліетиленовому шлангу; б – типу СБВГнг 24×0,9 з мідними жилами, поліетиленовою ізоляцією, в оболонці з ПВХ-пластикату зниженої горючості.

Рис. 1. Сигнально-блокувальні кабелі виробництва ПАТ «Завод Південкабель»

Іншими словами, конструкція СБ кабелю проектується таким чином, щоб забезпечити не лише передачу сигналів з необхідними електричними параметрами, а й мінімізувати ризики займання або поширення вогню при пожежах. Для цього велике значення мають вибір матеріалів ізоляції та оболонок, про що детальніше йдеться далі.

Вогнестійкі матеріали ізоляція і оболонки. Традиційно ізоляція струмопровідних жил сигнальних кабелів виконується з полімерів із високими електроізоляційними властивостями – найчастіше з поліетилену (через його низькі діелектричні втрати та стабільність характеристик). Оболонки багатьох старих модифікацій кабелів виготовлялися з полівінілхлориду (ПВХ),

який сам по собі є відносно вогнестійким (важко займистим) матеріалом завдяки наявності хлору. Проте ПВХ при горінні виділяє густий чорний дим і корозійні гази (хлороводень), що небезпечно для людей і обладнання. Тому сучасна тенденція – перехід до безгалогенних матеріалів з низьким димоутворенням (категорія LSZH – *low smoke zero halogen*) [3]. Оболонки на основі безгалогенних полімерів (модифікованих поліолефінів) здатні не поширювати полум'я і при цьому не виділяють токсичних корозійних газів при тлінні. Для забезпечення таких властивостей до складу полімерів додають спеціальні антипірени (вогнезахисні добавки). Провідні кабельні підприємства впроваджують сучасні вогнестійкі компаунди та антипіренові домішки до матеріалу оболонки й ізоляції, щоб підвищити пожежобезпечність продукції.

Антипірени та їх дія. Вогнезахисні добавки (антипірени) бувають різних хімічних типів і діють кількома механізмами. Розрізняють реактивні антипірени, що хімічно зв'язуються з полімером при його синтезі, та адитивні антипірени, що вводяться в готовий полімер як наповнювач. Перші стають частиною полімерної матриці і не вимиваються з часом, другі – простіші у застосуванні, але можуть впливати на властивості матеріалу. Загалом антипірени уповільнюють горіння кабелю кількома способами. По-перше, вони хімічно гасять полум'я, перехоплюючи вільні радикали горіння ($H\cdot$, $OH\cdot$), і тим самим зупиняють розвиток реакцій окиснення. По-друге, багато антипіренів сприяють утворенню захисного шару (обуглення) на поверхні полімеру при високій температурі, ізолюючи матеріал від дії вогню. Такий вуглецевий шар або склоподібна плівка перешкоджає подальшому прогріванню внутрішніх шарів кабелю. По-третє, деякі добавки при нагріванні виділяють інертні гази (воду, CO_2 , азот), які розбавляють горючі продукти і знижують концентрацію кисню поблизу палаючої поверхні [3]. Комплекс цих механізмів значно підвищує вогнестійкість кабельних матеріалів.

Типові антипірени для кабельних полімерів – це галогеноорганічні сполуки (на основі хлору або броду) та безгалогенні системи. Галогенвмісні добавки (як-от хлоровані парафіни, бромовані дифенілові етери тощо) ефективно гальмують полум'я за рахунок радикального механізму, але їх застосування обмежують через токсичність і корозійність диму. Натомість безгалогенні антипірени, що нині набули найбільшого поширення, – це здебільшого неорганічні гідроксиди та фосфоровмісні сполуки. Зокрема, гідроксид алюмінію (ATH) та гідроксид магнію (MDH) вводяться у полімерну оболонку або ізоляцію у великих кількостях (до десятків відсотків) і при нагріванні виділяють воду, одночасно утворюючи теплостійкий шар оксидів Al_2O_3 та MgO , який екранує полімер від вогню. Фосфатні та фосфорно-азотні антипірени (наприклад, амоній поліфосфат, меламін тощо) сприяють вуглеутворенню і спінюванню захисного шару (так звані інтумесцентні системи), а також можуть виділяти негорючі гази. Сучасні композиції нерідко поєднують кілька типів антипіренів для досягнення оптимального ефекту.

Відповідність європейським нормам та методи випробувань пожежної безпеки. Пожежна безпека кабельної продукції в країнах Європейського Союзу

регламентується стандартом EN 50575, який впроваджений в Україні як ДСТУ EN 50575:2018 та реалізує вимоги Регламенту (EU) №305/2011 (CPR). Зазначений нормативний документ встановлює систему обов'язкової класифікації кабелів за реакцією на вогонь для їх застосування в будівлях та інженерних спорудах. Класифікація базується на оцінюванні поведінки кабелю під час горіння та включає визначення основного єврокласу, а також додаткових індексів, що характеризують вторинні небезпеки – димоутворення, утворення горючих крапель і кислотність продуктів згорання.

Система єврокласів охоплює діапазон від Аса (негорючі кабелі) до Fca (показники не визначаються), що дозволяє стандартизовано оцінити рівень пожежної небезпеки продукції. Для СБ кабелів, які застосовуються в системах управління, автоматики та сигналізації, типовими є класи Csa або Dsa залежно від матеріалу ізоляції та оболонки. Зокрема, застосування безгалогенних полімерних композицій (LSZH) забезпечує зменшення інтенсивності димоутворення та корозійної активності газів, що особливо важливо для громадських і промислових об'єктів.

Таблиця 1 – Класифікація кабелів за реакцією на вогонь відповідно до EN 50575 (гармонізовано як ДСТУ EN 50575:2018)

Параметр	Позначення	Характеристика	Гармонізація в Україні
Основні єврокласи	Аса–Fca	Від негорючих до таких, що не нормуються	ДСТУ EN 50575:2018
Димоутворення	s1–s3	Від мінімального до необмеженого	ДСТУ EN 50399
Горючі краплі	d0–d2	Від відсутності до необмежених	ДСТУ EN 50399
Кислотність газів	a1–a3	Від мінімальної корозійності до необмеженої	ДСТУ EN 60754-2

Повне маркування, наприклад Csa-s1,d1,a1, формується на підставі результатів випробувань і відображає комплексну оцінку відповідності поведінки кабелю.

Встановлення відповідності зазначеним класам здійснюється шляхом проведення стандартизованих вогневих випробувань. Ключовими методиками є випробування на вертикальне поширення полум'я одиночного кабелю (EN 60332-1-2), випробування пучка кабелів на тепловиділення та димоутворення (EN 50399), а також визначення щільності диму (EN 61034-2) і кислотності продуктів згорання (EN 60754-2).

Випробування EN 60332-1-2 передбачає вплив палика потужністю 1 кВт на вертикально розташований зразок кабелю довжиною 1 м з подальшою оцінкою довжини пошкодженої ділянки та здатності до samozagasanня. Метод EN 50399 є більш комплексним і моделює умови інтенсивної пожежі в кабельних трасах; при цьому вимірюються швидкість тепловиділення, сумарне тепловиділення та кількість диму. Оцінювання світлопропускання диму та кислотності конденсату дозволяє встановити індекси s та a відповідно.

Таблиця 2 – Основні методи випробувань реакції кабелів на вогонь

Стандарт	Гармонізація в Україні	Суть випробування	Основні показники
EN 60332-1-2	ДСТУ EN 60332-1-2	Вертикальне горіння одиночного кабелю	Довжина пошкодження, samozagasanня
EN 50399	ДСТУ EN 50399	Горіння пучка кабелів (~20 кВт)	HRR, THR, димоутворення
EN 61034-2	ДСТУ EN 61034-2	Визначення щільності диму	Світлопропускання
EN 60754-2	ДСТУ EN 60754-2	Визначення кислотності газів	pH та електропровідність

На підставі сукупності отриманих результатів формується декларація експлуатаційних характеристик відповідно до CPR.

Окремо від реакції на вогонь регламентується вогнестійкість кабелів – здатність зберігати електричну цілісність під час пожежі. Такі кабелі застосовуються в системах пожежної сигналізації, аварійного

освітлення та інших критично важливих мережах. Конструктивно вони містять теплоізоляційні бар'єри, зокрема слюдяні стрічки, що запобігають руйнуванню струмопровідних жил під дією високих температур. Випробування проводяться за стандартами EN 50200 та IEC 60331, гармонізованими в Україні як ДСТУ EN 50200 та ДСТУ IEC 60331.

Таблиця 3 – Стандарти випробувань вогнестійкості кабелів та їх гармонізація в Україні

Стандарт	Український гармонізований стандарт	Маркування	Час збереження працездатності	Умови випробування
IEC 60331	ДСТУ IEC 60331	E15–E120	15–120 хв	Дія полум'я з контролем електричної цілісності
EN 50200	ДСТУ EN 50200	PH30–PH120	30–120 хв	~830 °C + механічні удари

Методика EN 50200 передбачає вплив температури близько 830 °С з періодичними механічними ударами; клас PH60 означає збереження працездатності протягом 60 хвилин за таких умов. Випробування за IEC 60331 визначають здатність кабелю підтримувати електричну цілісність під час безперервного впливу полум'я.

Таким чином, система європейського технічного регулювання охоплює як оцінювання поведінки кабелю під час горіння, так і перевірку його функціональної стійкості в умовах пожежі. Гармонізація зазначених стандартів в Україні забезпечує уніфікований підхід до підтвердження пожежної безпеки СБ кабелів та підвищує рівень захищеності інженерних систем.

Методи випробувань пожежної безпеки. Оцінювання кабелів на відповідність зазначеним нормам здійснюється шляхом стандартизованих вогневих випробувань. Для класифікації за EN 50575 ключовими є такі методики: випробування на вертикальне поширення полум'я одиночного кабелю (IEC/EN 60332-1-2) та випробування на тепловиділення і димоутворення при горінні пучка кабелів (EN 50399). У тесті EN 60332-1-2 зразок кабелю довжиною 1 м підпалюється пальником потужністю 1 кВт; кабель повинен самозагаснути невдовзі після прибрання пальника, а довжина прогорілої частини не перевищити ліміт. Метод EN 50399 є жорсткішим: група з кількох кабелів горить під впливом потужного джерела запалювання (~20 кВт), і спеціальне обладнання вимірює параметри горіння – швидкість поширення полум'я, тепловиділення, кількість диму. Паралельно проводяться тести на щільність диму (IEC/EN 61034-2) та корозійність газів (IEC/EN 60754-2) – при спаленні зразка кабелю оцінюють світлопропускання димових газів і рівень кислотності конденсату. Відповідно до отриманих результатів визначається клас кабелю: наприклад, щоб отримати клас Cca-s1,d1,a1, зразок повинен обмежувати тепловиділення і поширення полум'я (клас Cca), утворювати дуже мало диму (s1), не давати горючих крапель (d1) і виділяти мало корозійних газів (a1). Усі ці критерії перевіряються в комплексі під час сертифікаційних випробувань, і тільки у разі відповідності кабель отримує декларацію експлуатаційних показників згідно CPR (Regulation (EU) No 305/2011, що включає EN 50575) [9]. Для спеціальних вогнестійких кабелів застосовуються додаткові випробування на працездатність під час пожежі. Згаданий стандарт BS EN 50200 (і подібний міжнародний IEC 60331) передбачає, що зразок кабелю горить у горизонтальному положенні при температурі ~830 °С, при цьому через кожні 5 хвилин по ньому вдаряють металевим стрижнем для імітації обвалів. Якщо кабель витримує 30 хвилин такого впливу без втрати електричного кола, йому надається рейтинг PH30, якщо 60 хв – PH60, 120 хв – PH120 [2]. Додатково може застосовуватися водяне зрошення наприкінці тесту (наприклад, стандарт BS EN 50200 Annex E), що ще більше наближує умови до реальної пожежі з гасінням водою. Випробування на відповідність класам вогнестійкості особливо актуальні для кабелів систем оповіщення, аварійного живлення, проте світова тенденція – підвищувати вогнестійкість і

звичайних кабелів управління, аби виграти час для захисту важливих систем під час надзвичайних ситуацій.



Рис. 2. Приклад випробування на вертикальне поширення полум'я одиночного кабелю (IEC/EN 60332-1-2).

Активне впровадження безгалогенних антипіренів у матеріали кабелів спонукало численні дослідження їхнього впливу на електричні та фізичні характеристики ізоляції. З одного боку, додавання великої кількості наповнювачів може змінювати діелектричні параметри полімеру; з іншого – такі заходи є необхідними для досягнення високих показників вогнестійкості. За результатами експериментів встановлено, що введення значних концентрацій (наприклад, ~60 часток на 100 часток полімеру) неорганічних гідроксидів у поліетиленову ізоляцію дещо підвищує її діелектричну проникність (на $\Delta\epsilon \approx 0,2-0,5$) та діелектричні втрати. Зокрема, при додаванні 60 част. гідроксиду алюмінію (ATH) відносна діелектрична проникність поліетилену зростає на ~0,3, а тангенс кута діелектричних втрат збільшується на 15–25% (на частоті 1 МГц) порівняно з чистим полімером [4]. Подібні, хоча й менші за величиною, зміни спостерігаються і для фосфатних антипіренів: так, амоній поліфосфат при рівноцінному дозуванні підвищує ϵ всього на ~0,1–0,3, проте його гігроскопічність може призводити до росту діелектричних втрат за високої вологості [4]. Важливо відзначити, що антипірени можуть містити йонні домішки, які впливають на електричний опір ізоляції. Наприклад, невипалений ATH здатен знизити об'ємний опір полімеру з $\sim 10^{16}$ до $10^{14}-10^{15}$ $\Omega \cdot \text{см}$ через наявність слідів Na^+ чи Cl^- , натомість очищення наповнювача дозволяє відновити опір до $>10^{15}$ $\Omega \cdot \text{см}$ [4]. Гідроксид магнію (MDH) у цьому плані кращий – він містить менше йонних домішок, і при 60 phr забезпечує питомий опір $\sim 10^{15}-10^{16}$ $\Omega \cdot \text{см}$. Втім, перевищення концентрації MDH понад ~40% може погіршувати ізоляційні властивості через агломерацію часток; застосування поверхневої обробки часток (наприклад, жирними кислотами) допомагає зберегти високий опір навіть при 70 phr MDH [4].

Попри незначний негативний вплив на діелектричні параметри, антипірени практично не погіршують ізоляційні властивості кабелів на робочих частотах (50–60 Гц). Вимірювання показують, що за низьких

частот різниця у діелектричних втратах між чистим полімером та наповненим антипіреном ϵ мінімальною. Натомість ключові електричні параметри, такі як електрична міцність (пробивна напруженість) і стійкість до часткових розрядів, можуть трохи змінюватися. Додавання 60 phr АТН в поліетилен знижує пробивну напруженість ~на 10–15% (з ~35 до 30 кВ/мм), що пов'язано з виникненням мікропор та неоднорідностей навколо часток. MDH-наповнювач впливає менше: при тому ж дозуванні зниження міцності складає лише ~5%, завдяки кращій адгезії частинок до матриці. Високі характеристики електричної міцності вдається зберегти при поєднанні різних антипіренів. Зокрема, композиція з 30 phr MDH та 10 phr фосфатного антипірену забезпечує полімеру клас негорючості UL 94 V-0 (самозатухання) і одночасно пробивну напругу ~34–35 кВ/мм, майже як у вихідного полімеру [4]. Таким чином, правильний підбір і комбінування антипіренових домішок дозволяє досягти високої вогнестійкості кабельних матеріалів без критичного погіршення їхніх електричних показників.

Важливим аспектом є довговічність вогнезахисних властивостей кабелю протягом усього терміну служби. Термін експлуатації СБ кабелів становить не менше 25 років [6], і весь цей час матеріали ізоляції піддаються тепловому старінню, впливу вологи, струмів тощо. Прискорені випробування старіння (виримування зразків при підвищеній температурі, еквівалентній багаторічній експлуатації) показали, що внесення антипіренів не повинно знижувати довговічність ізоляції. За даними випробувань, проведених у виробничій лабораторії НТУ «ХП», зразки сигнального кабелю з вогнезахисними добавками після прискореного теплового старіння зберегли необхідний рівень електричної міцності та ізоляційного опору. Зарубіжні дослідження також вказують, що ефекти старіння можуть бути прийнятними: наприклад, для вогнестійких оболонки на основі ПВХ після 14 діб термічного старіння при 135 °C показник кисневого індексу (LOI) зменшується лише з 28,5% до 28,3%, а пікове тепловиділення при горінні навіть знижується на ~17%, що свідчить про формування стабільнішого захисного шару. Хоча різні полімерні системи поведуться по-різному (деякі матеріали з часом втрачають антипіренові властивості, інші – навпаки стають менш займистими через вигорання летких компонентів [5]), належний підбір рецептури забезпечує довготривалу пожежну безпеку кабелю. Таким чином, результати досліджень підтверджують можливість підвищення вогнестійкості СБ кабелів шляхом застосування сучасних матеріалів та технологій без шкоди для їхніх основних електричних та експлуатаційних характеристик.

Аналіз стану та тенденцій розвитку СБ кабелів засвідчує, що на перший план виходить поєднання високої надійності з вимогами пожежної безпеки. В умовах зростаючої цифровізації та ускладнення інфраструктури зростає важливість інтелектуалізації кабельних мереж. Перспективним напрямом є інтеграція сенсорних елементів безпосередньо у конструкцію кабелю для моніторингу його стану. Наприклад, у сучасних кабельних лініях вже впроваджуються волоконно-

оптичні сенсори, вбудовані вздовж кабелю, що дозволяє в реальному часі відстежувати температуру, механічні напруження і навіть ознаки часткових розрядів по всій довжині траси. Такі «розумні» кабелі можуть автоматично сигналізувати про перегрів чи пошкодження ізоляції та допоможуть прогнозувати залишковий ресурс, що суттєво підвищить надійність мереж і безпеку експлуатації. Для критичних об'єктів, де високі ризики пожеж чи диверсій (на кшталт залізничних вузлів, тунелів, електропідстанцій), впровадження самодіагностувальних вогнестійких кабелів стане важливою складовою інфраструктурної безпеки.

З точки зору матеріалознавства, продовжується пошук і впровадження нових композицій полімерів з підвищеною стійкістю до вогню. Перспективними є наноконструкції ізоляції, де застосування наночастинок (глини, силіка, графен тощо) дозволяє підвищити температуру плавлення та міцність матеріалу при збереженні його електричних характеристик. Наприклад, добавки на основі глинистих нанотрубок можуть діяти як бар'єр проти дифузії газів і уповільнювати вигорання полімеру. Інший напрям – реактивні антипірени нового покоління, які хімічно зв'язуються з полімером і не мігрують з нього протягом десятиліть, забезпечуючи довготривалу вогнестійкість. Синтез полімерів із уже вбудованими фосфорвмісними або азотовмісними фрагментами дозволяє отримати самозатухаючі ізоляційні матеріали без потреби у великих дозах мінеральних наповнювачів. Це зменшує негативний вплив на електричні та механічні властивості кабелю.

Для України актуальним є подальше гармонізування стандартів з європейськими та впровадження передових технологій у вітчизняне кабельне виробництво. Гармонізація в Україні стандарту ДСТУ EN 50575:2018 з європейським стандартом EN 50575:2014+A1:2016 означає перехід до оцінювання пожежної безпеки кабелів за критеріями, що відповідають практиці ЄС. Це стимулює розвиток власних вогнестійких матеріалів і рецептур, адаптованих під вітчизняну сировинну базу. Зростаючий попит на кабельно-провідникову продукцію для відбудови інфраструктури (залізниць, об'єктів енергетики) створює можливість для інновацій у цій галузі. Війна продемонструвала критичну важливість стійкості інфраструктури – кабелі мають витримувати не лише стандартні навантаження, а й екстремальні впливи (пожежі, удари, затоплення) без втрати функціональності. У перспективі можна очікувати появу нових поколінь СБ кабелів, які поєднуютимуть вбудовану систему моніторингу стану, надвисоку вогнестійкість та здатність до самовідновлення ізоляції після незначних пошкоджень (через спеціальні терморегулювальні шари або капсулювання ремонтних сумішей).

Особливої уваги набуває питання пожежної безпеки кабельних мереж у воєнний і післявоєнний час. Об'єкти залізниці, енергетики та зв'язку нерідко стають цілями атак, що призводить до пожеж або руйнувань. Використання вогнестійких кабелів у таких умовах підвищує живучість систем – навіть якщо станеться займання, кабелі не стануть джерелом токсичного диму і збережуть працездатність достатньо довго,

щоб забезпечити евакуацію людей чи коректне вимкнення обладнання. Таким чином, інвестиції в сучасні СБ кабелі – це інвестиції в стійкість та безпеку критичної інфраструктури.

Висновки. СБ кабелі відіграють незамінну роль у забезпеченні роботи залізничних та інших систем управління, і вимоги до їхньої надійності та безпеки невпинно зростають. Проведений аналіз конструктивних особливостей цих кабелів показав, що, попри різноманітність виконань (кількість жил, матеріали ізоляції та оболонки тощо), всім їм ставиться спільне завдання – безперерйна передача сигналів в умовах можливих зовнішніх впливів, у тому числі пожеж. Забезпечення високої пожежостійкості досягається використанням сучасних безгалогенних матеріалів з додаванням антипіренів, які перешкоджають займанню і поширенню полум'я. Дотримання європейських стандартів (EN 50575 та ін.) дозволяє об'єктивно оцінити рівень пожежної небезпеки кабелів та стимулює їх удосконалення.

Лабораторні дослідження і практичний досвід експлуатації підтверджують, що правильно спроектовані кабелі можуть відповідати найвищим класам пожежної безпеки і одночасно зберігати необхідні електричні характеристики впродовж всього життєвого циклу. Застосування вогнезахисних добавок дещо змінює діелектричні властивості ізоляції, але не приводить до критичних відхилень, якщо використано якісні очищені наповнювачі та оптимальну рецептуру компаунду [4]. Ба більше, такі кабелі після багатьох років служби зберігають здатність протистояти вогню завдяки стійкості полімерної матриці та незворотнім змінам, що покращують обуглення [5]. В умовах зростання вимог до інфраструктури – як техногенних, так і обумовлених безпековими викликами – розвиток СБ кабелів спрямований на підвищення їхньої надійності, розумність (інформативність) та вогнестійкості. Результати сучасних наукових досліджень закладають основу для створення нових поколінь кабелів, здатних задовольнити ці вимоги. Таким чином, впровадження прогресивних конструктивних рішень і матеріалів для СБ кабелів є запорукою підвищення живучості та безпеки критичних інфраструктур, що набуло особливої актуальності у сьогоденні.

Список літератури:

1. ДСТУ EN 50575:2018. Кабелі силові, контрольні та зв'язку. Кабелі для загального використання в будівельних спорудах згідно з вимогами щодо реакції на вогонь (EN 50575:2014, A1:2016, IDT). – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
2. Kiessaiev O., Gontar Y., Kovalek P. Analysis of determination of fire resistance limits of cable lines. Proc. IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek 2023), 2023 DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312995
3. HELUKABEL. Flame-retardant cables: How do they work and why do they matter? HELUKABEL Vietnam (2023) <https://www.helu.com/vn-en/cables-and-wires-flame-retardant-but-also-halogen-free.html>
4. Baozhuan New Material. The electrical properties of halogen-free flame retardants for cable materials. Company news article, 2023 <https://www.additivebz.com/the-application-of-halogen-free-flame-retardants-in-the-wire-and-cable-industry>
5. J Jiang, Y.; He, W.; Huo, X.; Lu, X.; Li, K.; Xiao, F. Unveiling Thermal Degradation and Fire Behavior of 110 kV Ultra-High-Voltage Flame-Retardant Cable Sheath After Thermal Aging. Polymers 2025, 17, 1273. <https://doi.org/10.3390/polym17091273>

6. АТ «Одескабель». Кабель сигнально-блокувальний СБПу. Технічний опис продукції (онлайн) <https://odeskabel.com/products>
7. UkrVisti. Rising Demand for Train Services in Ukraine. News, 06 Aug 2025 <https://ukrvisti.com/en/news/2548-details/>
8. Dorokhina A. Ukraine in Motion: Inclusive Paths Ahead. EU Mobility & Transport, 12 Sep 2025 https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en
9. MotisTech. EU Cable Fire Testing under CPR (Construction Products Regulation 2016/364). <https://www.motistech.com/solution/eu-cable-fire-testing-cpr>
10. ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ». Кабель сигнально-блокувальний. Технічний опис продукції (онлайн) <https://www.yuzhcable.info/cat/24>
11. Li, Y.; Qi, L.; Liu, Y.; Qiao, J.; Wang, M.; Liu, X.; Li, S. Recent Advances in Halogen-Free Flame Retardants for Polyolefin Cable Sheath Materials. Polymers 2022, 14, 2876. <https://doi.org/10.3390/polym14142876>
12. Meiniere R., Sonnier R., Zavaleta P., Suard S., Ferry L. Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter. Journal of Hazardous Materials, 2018, 342, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.027>
13. Kaczorek-Chrobak, K.; Fangrat, J. Combustible Material Content vs. Fire Properties of Electric Cables. Energies 2020, 13, 6172. <https://doi.org/10.3390/en13236172>
14. Kaczorek-Chrobak, K.; Fangrat, J.; Papis, B.K. Calorimetric Behaviour of Electric Cables. Energies 2021, 14, 1007. <https://doi.org/10.3390/en14041007>
15. Yu, F.; Wang, S.; Tang, K.; Lin, Y.; Wang, S.; Zhang, Y. Research Progress on the Fire Characteristics of Electric Cables and Wires. Fire 2024, 7, 186. <https://doi.org/10.3390/fire7060186>
16. Mutlu K., Mercan O., Dağdelen D., Uslu G., Yiğitler Ö., Uçar Ç., Hartomacioğlu S. Development and Evaluation of Fire Resistant Railway Signalling Cable // European Journal of Science and Technology. 2021. No. 29. P. 366–370. DOI: 10.31590/ejosat.1022791.
17. Vijay R., Prabhakar T. V. Causal AI for cable health monitoring // Measurement. 2025. Vol. 253. Art. 117705. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.117705.
18. Prysmian Group. Railway Infrastructure Cables. Technical catalogue. 2016. https://www.prysmian.com/sites/default/files/atoms/files/2016_09%20Railway%20Cables%20Catalogue%20WEB-version.pdf
19. Prysmian Group. Railway Cables. Technical catalogue. 2015. https://de.prysmian.com/sites/default/files/2015_10%20Railway%20Cable%20Catalogue%20-reduced_1.pdf

References (transliterated)

1. DSTU EN 50575:2018. Kabeli sylovi, kontrolni ta zviazku. Kabeli dlia zahalnoho vykorystannia v budivelnih sporudakh zghidno z vymohamy shchodo reaktsii na vohon (EN 50575:2014, A1:2016, IDT). – Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2019.
2. Kiessaiev O., Gontar Y., Kovalek P. Analysis of determination of fire resistance limits of cable lines. Proc. IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek 2023), 2023 DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312995
3. HELUKABEL. Flame-retardant cables: How do they work and why do they matter? HELUKABEL Vietnam (2023) <https://www.helu.com/vn-en/cables-and-wires-flame-retardant-but-also-halogen-free.html>
4. Baozhuan New Material. The electrical properties of halogen-free flame retardants for cable materials. Company news article, 2023 <https://www.additivebz.com/the-application-of-halogen-free-flame-retardants-in-the-wire-and-cable-industry>
5. J Jiang, Y.; He, W.; Huo, X.; Lu, X.; Li, K.; Xiao, F. Unveiling Thermal Degradation and Fire Behavior of 110 kV Ultra-High-Voltage Flame-Retardant Cable Sheath After Thermal Aging. Polymers 2025, 17, 1273. <https://doi.org/10.3390/polym17091273>
6. АТ «Одескабель». Кабель сигнально-блокувальний СБПу. Технічний опис продукції (онлайн) <https://odeskabel.com/products>
7. UkrVisti. Rising Demand for Train Services in Ukraine. News, 06 Aug 2025 <https://ukrvisti.com/en/news/2548-details/>
8. Dorokhina A. Ukraine in Motion: Inclusive Paths Ahead. EU Mobility & Transport, 12 Sep 2025 https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/ukraine-motion-inclusive-paths-ahead-2025-09-12_en
9. MotisTech. EU Cable Fire Testing under CPR (Construction Products Regulation 2016/364). <https://www.motistech.com/solution/eu-cable-fire-testing-cpr>

- cable-fire-testing-cpr
10. PAT «ZAVOD PIVDENKABEL». Kabel syhnalno-blokuvalnyi. Tekhnichnyi opys produktsii (onlain) <https://www.yuzhcable.info/cat/24>
 11. Li, Y.; Qi, L.; Liu, Y.; Qiao, J.; Wang, M.; Liu, X.; Li, S. Recent Advances in Halogen-Free Flame Retardants for Polyolefin Cable Sheath Materials. *Polymers* 2022, 14, 2876. <https://doi.org/10.3390/polym14142876>
 12. Meinier R., Sonnier R., Zavaleta P., Suard S., Ferry L. Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.027>
 13. Kaczorek-Chrobak, K.; Fangrat, J. Combustible Material Content vs. Fire Properties of Electric Cables. *Energies* 2020, 13, 6172. <https://doi.org/10.3390/en13236172>
 14. Kaczorek-Chrobak, K.; Fangrat, J.; Papis, B.K. Calorimetric Behaviour of Electric Cables. *Energies* 2021, 14, 1007. <https://doi.org/10.3390/en14041007>
 15. Yu, F.; Wang, S.; Tang, K.; Lin, Y.; Wang, S.; Zhang, Y. Research Progress on the Fire Characteristics of Electric Cables and Wires. *Fire* 2024, 7, 186. <https://doi.org/10.3390/fire7060186>
 16. Mutlu K., Mercan O., Dağdelen D., Uslu G., Yiğitler Ö., Uçar Ç., Hartomacioğlu S. Development and Evaluation of Fire Resistant Railway Signalling Cable // *European Journal of Science and Technology*. 2021. No. 29. P. 366–370. DOI: 10.31590/ejosat.1022791.
 17. Vijay R., Prabhakar T. V. Causal AI for cable health monitoring // *Measurement*. 2025. Vol. 253. Art. 117705. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.117705.
 18. Prysmian Group. Railway Infrastructure Cables. Technical catalogue. 2016. https://www.prysmian.com/sites/default/files/atoms/files/2016_09%20Railway%20Cables%20Catalogue%20WEB-version.pdf
 19. Prysmian Group. Railway Cables. Technical catalogue. 2015. https://de.prysmian.com/sites/default/files/2015_10%20Railway%20Cable%20Catalogue%20-reduced_1.pdf

Надійшла (Received) 18.02.2026

Прийнята (Accepted) 05.03.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Мукосєєв Данило Павлович (Mukosieiev Danylo Pavlovych) – аспірант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апарати, м. Харків, Україна; e-mail: Danylo.Mukosieiev@ieeee.khpi.edu.ua.