

Аналіз наукових статей CIGRE B2 2026 щодо застосування для енергосистеми України

Аналітичний огляд 83 наукових публікацій секції B2 «Повітряні лінії» конференції CIGRE 2026 в контексті модернізації, відновлення та підвищення стійкості енергосистеми України



Підготував :

Міжнародний експерт CIGRE
Ян Штефунік
НТК ЕНПАСЕЛЕКТРО

Вступ: Стан енергосистеми України та актуальність досліджень

Критична ситуація

Внаслідок збройного конфлікту значна частина інфраструктури ПЛ 110–750 кВ пошкоджена або зруйнована, потребує термінового відновлення та модернізації.

Масштаб завдань

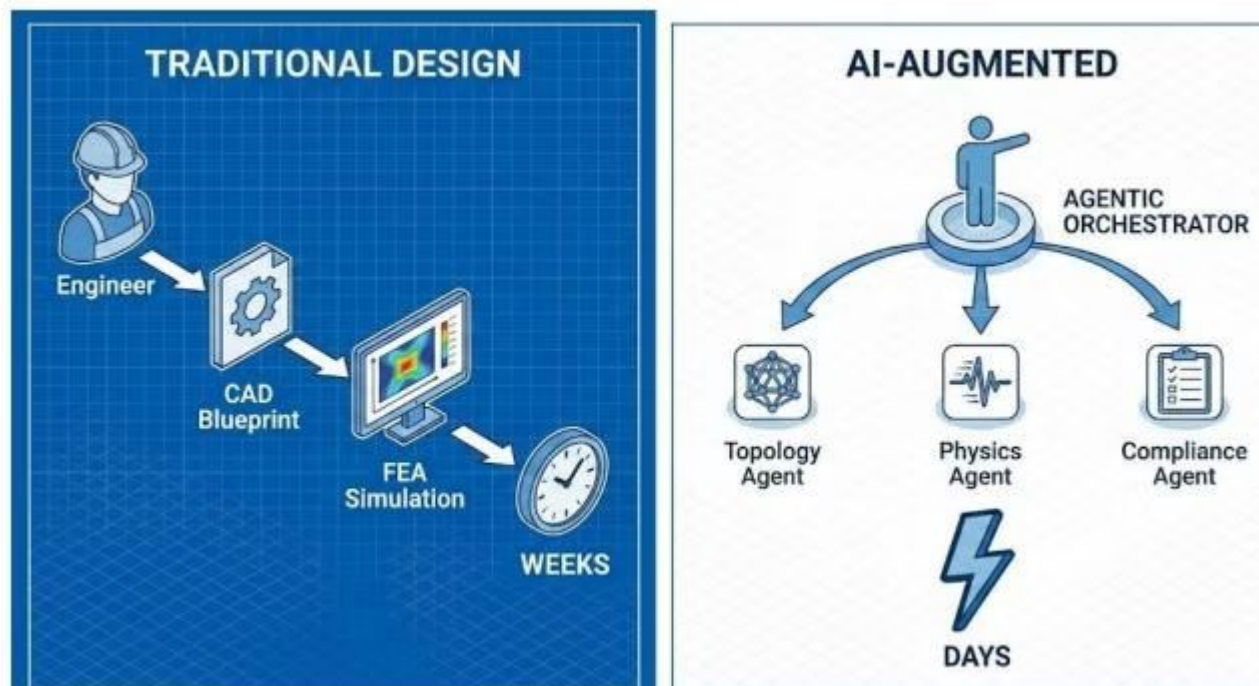
Україна має понад **22 000 км** ліній 220–750 кВ та близько **170 000 км** ліній 110 кВ і нижче — більшість збудована у 1960–1990-х роках і потребує комплексної модернізації.

Мета аналізу

Систематизувати передові технічні рішення з **83 статей CIGRE B2 2026** та визначити пріоритети їх впровадження в Україні з урахуванням воєнного та постконфліктного контексту.

⚠ Більшість ліній збудована у 1960–1990-х роках — критичний вік для фундаментів, провідників та ізоляторів одночасно з воєнними пошкодженнями.

Структура аналізованих публікацій



PS1 — Модернізація та нові технології ПЛ

42 статті

- Нові провідники та HTLS-технології
- Опори нового покоління та AI-проекування
- Цифровий двійник та BIM
- Методи будівництва та безпека

PS2 — Оцінка стану та реконструкція ПЛ

24 статті

- Діагностика та технічне обслуговування
- Ізолятори та арматура
- Фундаменти та ґрунтові умови
- БПЛА та дистанційний моніторинг

PS3 — Сталий розвиток та кліматичні зміни

17 статей

- Ожеледні та вітрові навантаження
- Екологія та циркулярна економіка
- LCA та вуглецевий слід
- Кліматична адаптація

Розділ І. Модернізація та нові технології повітряних ліній

PS1 · 42 СТАТТІ

Перший розділ охоплює найбільш численний масив публікацій CIGRE B2 2026 — **42 статті**, присвячені новітнім провідниковим технологіям, методам цифрового проектування та будівництва, а також інноваційним системам моніторингу й управління пропускною здатністю. Для України цей розділ є найбільш критичним: саме технології модернізації визначатимуть темпи та якість відновлення енергосистеми в найближчі роки.

01

Нові провідники та матеріали

HTLS, ACSS, ACCC — рекондукторинг без заміни опор

02

Цифрові технології

AI-проекування, BIM, цифровий двійник, DLR

03

Методи будівництва

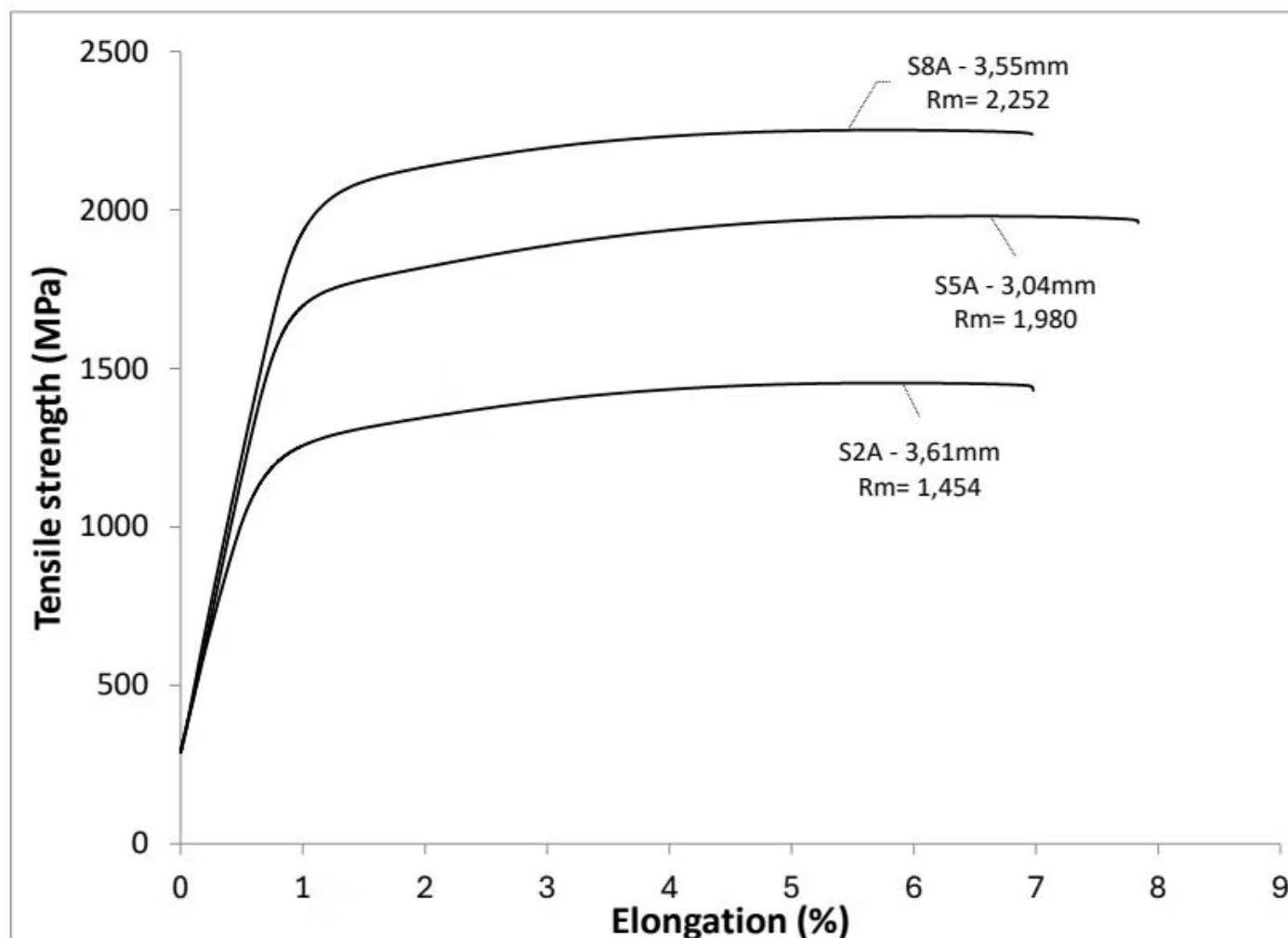
Безпечне зведення, компактне обладнання, нові системи натягування

04

Системи моніторингу

Блискавки, DLR, LiDAR, супутникові системи

Провідники HTLS: Підвищення пропускної здатності без заміни опор



Технологія ACSS/HTLS

Провідники з відпаленим алюмінієм та сталевим осердям дозволяють підвищити робочу температуру до **150–250°C**, збільшуючи пропускну здатність на **50–100%** без заміни опор. Технологія набула широкого застосування в Північній Америці та Європі. Завдяки новим провідниковим технологіям ACSS, ZT-ACSR та GAP пропускна здатність існуючих ліній може бути суттєво збільшена.

Сталеві осердя нового покоління

Дроти S8A з міцністю до **2200 Н/мм²** (стандарт IEC 63248-2022) та покриттям Zn95Al5 забезпечують термостабільність до **300°C** і корозійну стійкість у **3 рази вищу** за стандартний цинк. Бельгійський виробник довів, що ці дроти зберігають критичні механічні властивості та демонструють стабільну роботу під циклічними навантаженнями.

Застосування для України

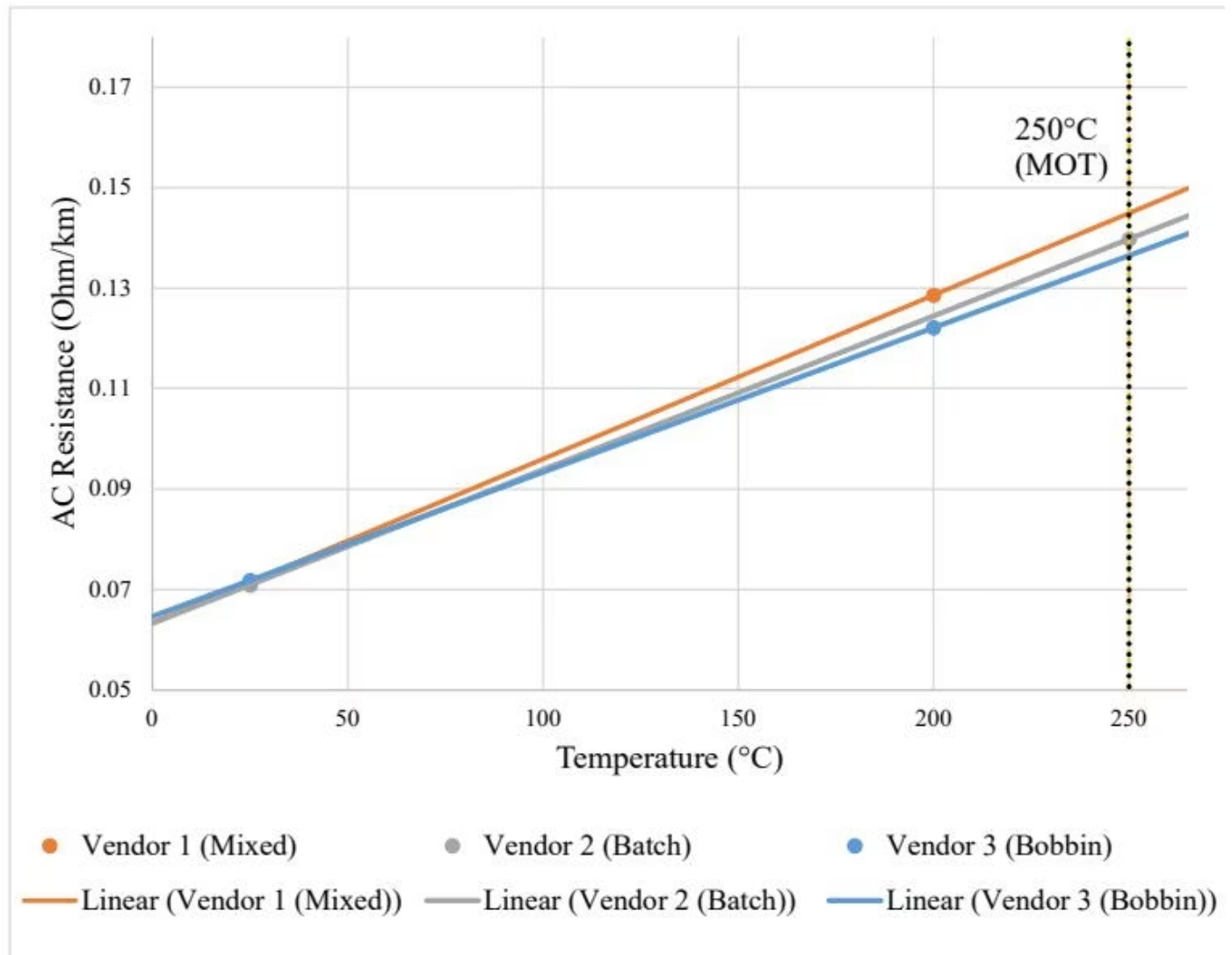
Рекондукторинг існуючих ліній **110–330 кВ** без демонтажу опор — найшвидший шлях відновлення пропускної здатності в умовах воєнного часу.

Основні переваги для України:

- Мінімальний час простою лінії — до 2–3 тижнів
- Не потрібне будівництво нового коридору
- Скорочення витрат у порівнянні з новою лінією на 60–70%
- Збільшення пропускної здатності без нового землевідведення

- ❑ HTLS-рекондукторинг — пріоритет №1 для відновлення критичних перетинів 220–330 кВ.

Порівняння методів відпалу провідників ACSS: Пакетний vs. Котушковий



Висновок дослідження

Дослідження показало, що метод відпалу (пакетний або катушковий) не є визначальним фактором для провисання та провідності — більший вплив мають **технологія виготовлення та допуски на скрутку**. При однакових технічних специфікаціях обидва методи дають схожі результати з точки зору механічних та електричних характеристик провідника.

Практичне значення для України

При закупівлі провідників ACSS для відновлення ліній слід орієнтуватися на **технічні характеристики конкретного виробника**, а не на метод відпалу. Це важливо для тендерних специфікацій: надмірне звуження вимог за методом відпалу може скоротити коло постачальників без реального виграшу в якості.

- Ключові параметри: допуски на скрутку, твердість дроту, міцність на розрив
- Обов'язкова вимога: відповідність IEC 62219 або ASTM B856
- Рекомендація: тестування провисання за IEEE 1283 на реальних зразках

Динамічне рейтингування ліній (DLR): Збільшення пропускної здатності в реальному часі



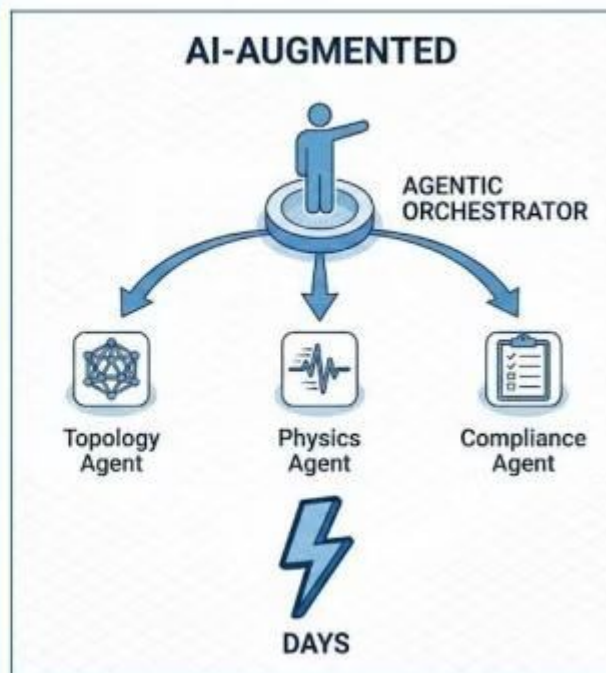
Архітектура системи DLR

Система включає метеостанції на опорах, нейронні мережі для калібрування прогнозів та орографічні буфери для врахування рельєфу місцевості. Реальна пропускна здатність визначається температурою проводу, швидкістю та напрямком вітру, температурою повітря та сонячною радіацією — всі ці параметри вимірюються безперервно.

Для України

DLR дозволяє максимально використати наявну інфраструктуру без капітальних вкладень у нові лінії. В умовах дефіциту пропускної здатності після пошкоджень — це найшвидший спосіб збільшити транзитний потенціал системи. Впровадження можливе паралельно з фізичним відновленням.

Штучний інтелект у проектуванні опор ПЛ



AI-Augmented Design

Система на основі ШІ (генеративний дизайн + ML-сурогати + навчання з підкріпленням) скорочує фазу попереднього проектування з **місяців до тижнів**, знижуючи масу конструкцій на **10–15%** — що транслюється в мільйони доларів економії на великих проектах.

Мультиагентна архітектура

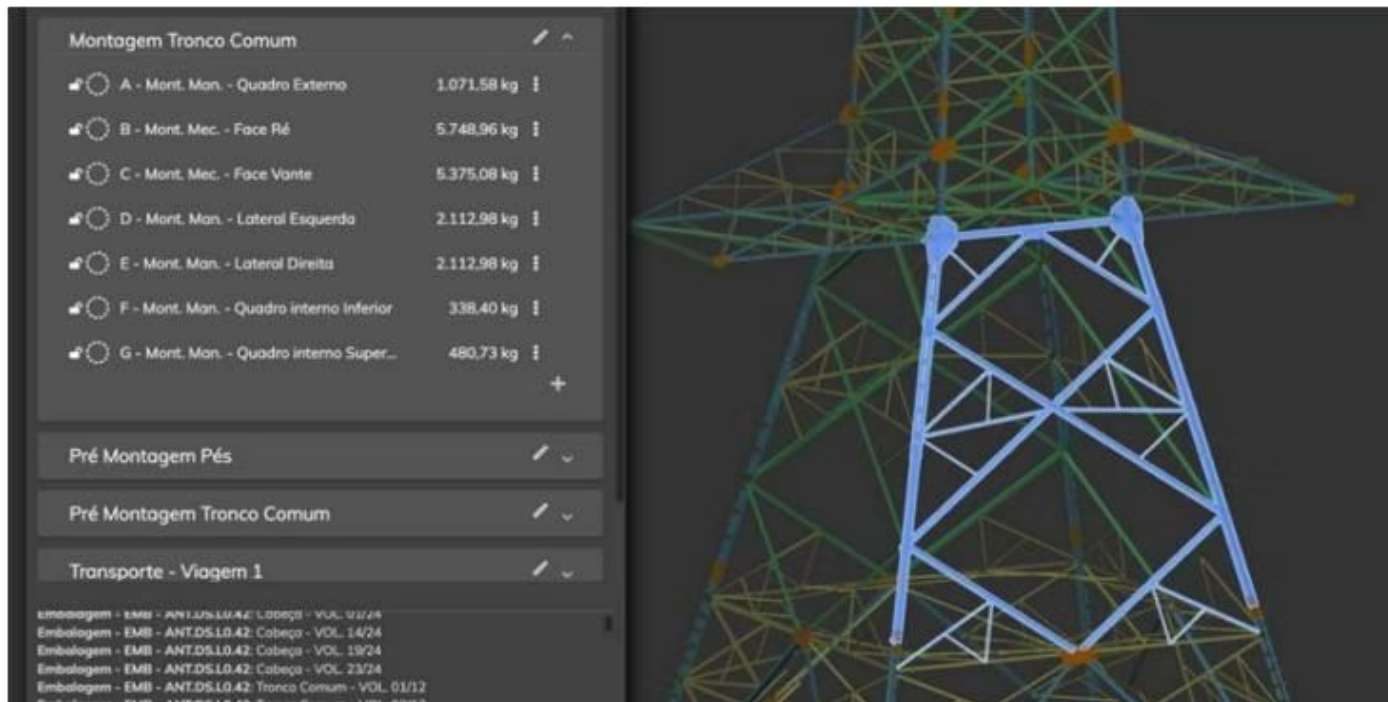
Агент-оркестратор координує трьох спеціалізованих агентів:

- **Агент топології** — генерує варіанти компоновки секцій опори
- **Агент фізики** — верифікує механічну відповідність (ASCE 10-15, Eurocode 3)
- **Агент відповідності нормам** — автоматична перевірка за нормативними базами

Актуальність для України

В умовах дефіциту досвідчених інженерів-проектувальників ШІ допомагає зберегти інституційні знання та прискорити масштабне проектування нових і відновлених опор. Потенційна економія при будівництві 500 нових км ліній — **понад 50 млн USD**.

Цифровий двійник для будівництва ПЛ 525 кВ



Кейс Бразилія: Лінія 525 кВ Батейас–Курітіба Лесте

Лінія довжиною **75 км з 199 опорами 12 типів** — впровадження BIM/Digital Twin скоротило графік будівництва на **4 місяці**. Система забезпечила 3D-візуалізацію всіх монтажних операцій ще до виходу бригад на об'єкт, що дозволило виявити та усунути конфлікти між елементами до початку монтажу.

Функціонал цифрового двійника

- 3D-візуалізація всіх типів опор та їх з'єднань
- Автоматичне формування специфікацій матеріалів
- Розрахунок центру ваги для операцій підйому
- Генерація схем стропування для кранів та гелікоптерів
- Інтеграція з графіком будівництва та логістикою

Для України

Цифровий двійник критично важливий для координації масштабного відновлення інфраструктури в умовах обмеженого часу та ресурсів. При одночасному відновленні десятків ліній цифрова платформа забезпечить:

- Єдину базу даних усіх відновлюваних об'єктів
- Оптимальний розподіл будівельних ресурсів між об'єктами
- Автоматичне формування виконавчої документації
- Інтеграцію з системами управління активами НЕК «Укренерго»

❑ Економія 4 місяці на кожному великому проекті при відновленні 20+ ліній — це роки прискорення.

Система Aim-Guide-Lock: Безпечне зведення опор без роботи під підвишеним вантажем

Проблема безпеки

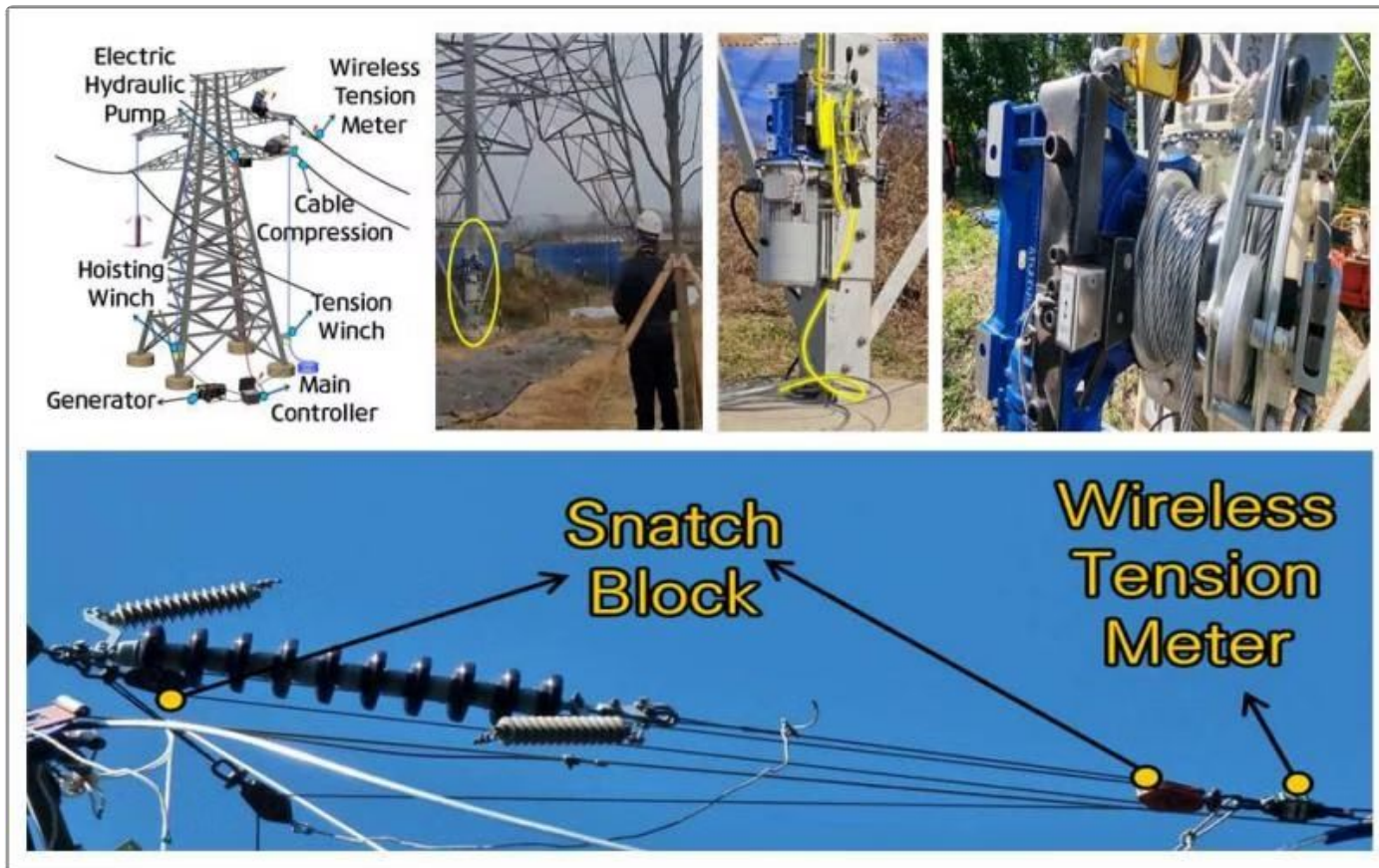
Робота під підвишеним вантажем — один з найбільших ризиків при будівництві ПЛ. Традиційні методи зведення решітчастих опор не змінювалися понад **100 років**: монтажники утримують елементи вручну під час позиціонування, що призводить до серйозних нещасних випадків.

Рішення: механічне блокування

Механічна система Aim-Guide-Lock забезпечує **самовирівнювання та механічне блокування** секцій опори без присутності робітників під вантажем. Порівняно з раніше запропонованими системами, пристрій досягає справжнього механічно заблокованого стану, уникає перешкод при складанні з'єднань, захищає покриття опори через контрольовані контактні інтерфейси. Система випробовується на лінії **500 кВ у Новому Південному Уельсі, Австралія**.

📌 В умовах відновлення ліній під тиском часу безпека монтажників має бути пріоритетом — нові методи зведення мінімізують ризики при прискореному будівництві.

Компактне модульне обладнання для натягування проводів



Традиційне обладнання

Вага: **2,5 т**

Потребує розчищення лісу та будівництва під'їзних доріг. Неможливо застосувати у важкодоступних або небезпечних районах.

Нова розробка КЕРСО (Корея)

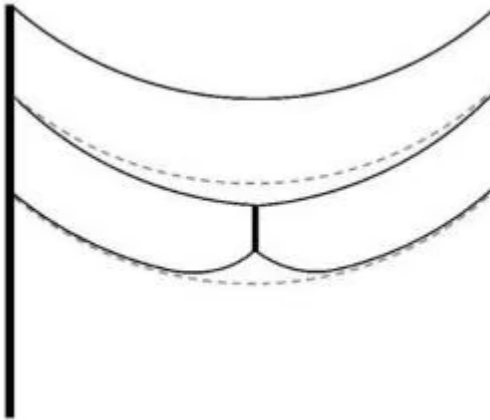
Вага: **~30 кг**

Кріпиться безпосередньо до опори, не потребує доріг. Дистанційне керування, автоматична зупинка при досягненні проектного натягу, моніторинг натягу в реальному часі.

Нове обладнання включає дистанційний контролер, що дозволяє здійснювати дистанційне управління та виключає необхідність утримання троса вручну — це значно знижує ризик нещасних випадків. Обладнання розроблено для автоматичної зупинки лебідки після досягнення попередньо встановленого проектного натягу.

- ✓ Для України: критично важливо для відновлення ліній у важкодоступних та небезпечних районах, включаючи зони розмінування.

Міжфазні розпірки для підвищення кліренсу: Нове застосування



Інноваційне застосування IPS

Міжфазні розпірки (IPS) традиційно використовуються для запобігання зіткненню проводів. Нова ідея — використовувати їх для **підвищення вертикального кліренсу** нижнього проводу без збільшення натягу. Розглядаючи IPS як новий метод, можна підвищити вертикальний кліренс провідників до рівня землі в ПЛ з вертикальним розташуванням трьох фаз.

Параметри кейсу

- Двоколова лінія **230 кВ**
- Провідник ACSR-Canary (515,1 мм²)
- Прольот **400 м**
- Моделювання у PLS-CADD підтвердило ефективність

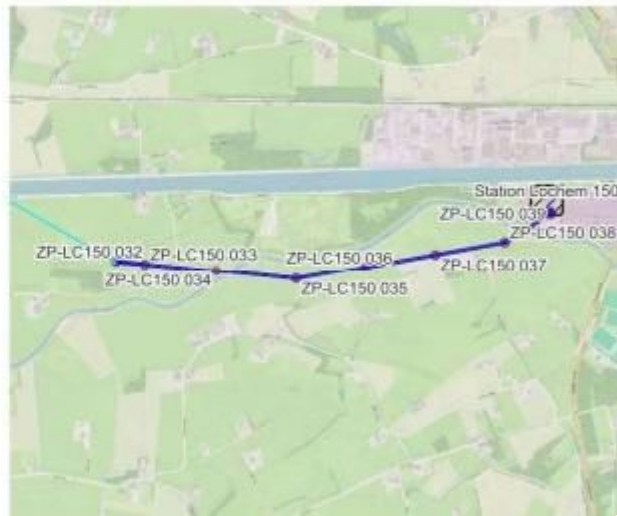
Для України

Технологія особливо актуальна для ліній, де кліренс зменшився внаслідок:

- Пошкодження опор та їх просідання
- Зміни рельєфу після військових дій
- Збільшення провисання через відсутність обслуговування
- Зростання рослинності у коридорах ліній

Встановлення IPS є значно дешевшим рішенням, ніж підйом проводів або заміна опор.

LiDAR + кліматичні дані + MSE: Точна оцінка кліренсів



Методологія DNV/TenneT

Інтеграція трьох джерел даних:

- **LiDAR** — 3D-модель місцевості та рослинності
- **Кліматичні дані** — локальна температура, вітер, сонячна радіація
- **MSE-моделювання** — деформація провідника при різних умовах навантаження

Кейс: лінія **150 кВ Зютфен–Лохем** (Нідерланди, 1970-х рр.) — поопорний аналіз кліренсів.

Результати та застосування для України

Комплексне використання LiDAR, кліматичних даних та MSE-моделювання суттєво підвищує точність та надійність оцінки кліренсів. Підхід дозволяє покращити виявлення локалізованих ризиків порушення кліренсу та підтримує обґрунтоване прийняття рішень для ефективної роботи мережі та управління активами.

Для України ця методологія необхідна для:

- Інвентаризації стану ліній після пошкоджень
- Визначення пріоритетів ремонту
- Збільшення пропускної здатності без фізичного підймання проводів

Модернізація мережі Косово: Паралелі з Україною



Схожа ситуація: Косово

З загальної довжини мережі **8 085 км**, повітряні лінії складають **6 427 км (79,5%)** — застаріла інфраструктура, зростаючий попит, необхідність інтеграції ВДЕ. Ситуація структурно дуже схожа на Україну.

Стратегія модернізації Косово

- Заміна ACSR на ACCC/ACSS провідники
- Впровадження SCADA з IoT-датчиками на кожній підстанції
- GIS-платформи управління активами
- Програма підготовки операційного персоналу

Результати пілотного проекту

Заміна провідника **ACSR 95/15** на **ACCC Silvassa**:

- Середнє навантаження зросло з **233 А до 261 А (+12%)**
- Провисання зменшилось на ~8%
- Втрати в провіднику знизились завдяки кращій провідності

Уроки для України

Косово демонструє, що навіть невелика постконфліктна країна може провести системну модернізацію мережі протягом 5–7 років за наявності правильної стратегії та міжнародної підтримки.

Апгрейд ліній 66 кВ до 220 кВ на існуючих опорах: Досвід Індії



Кейс ВВМВ: Дамба Бхакра, Індія

Успішне підвищення напруги з **66 кВ до 220 кВ** на існуючих опорах через дамбу Бхакра — без будівництва нових коридорів через топографічні та екологічні обмеження. Лінія 66 кВ була успішно проапгрейджена до 220 кВ з використанням тих самих опор та фундаментів.

Метод реалізації

- Структурний аналіз методом МСЕ кожної опори
- Вибіркове посилення фундаментів (там де необхідно)
- Заміна ізоляторів (підвищення класу ізоляції)
- Заміна проводів з більшим перерізом
- Перевірка кліренсів та захисних кутів

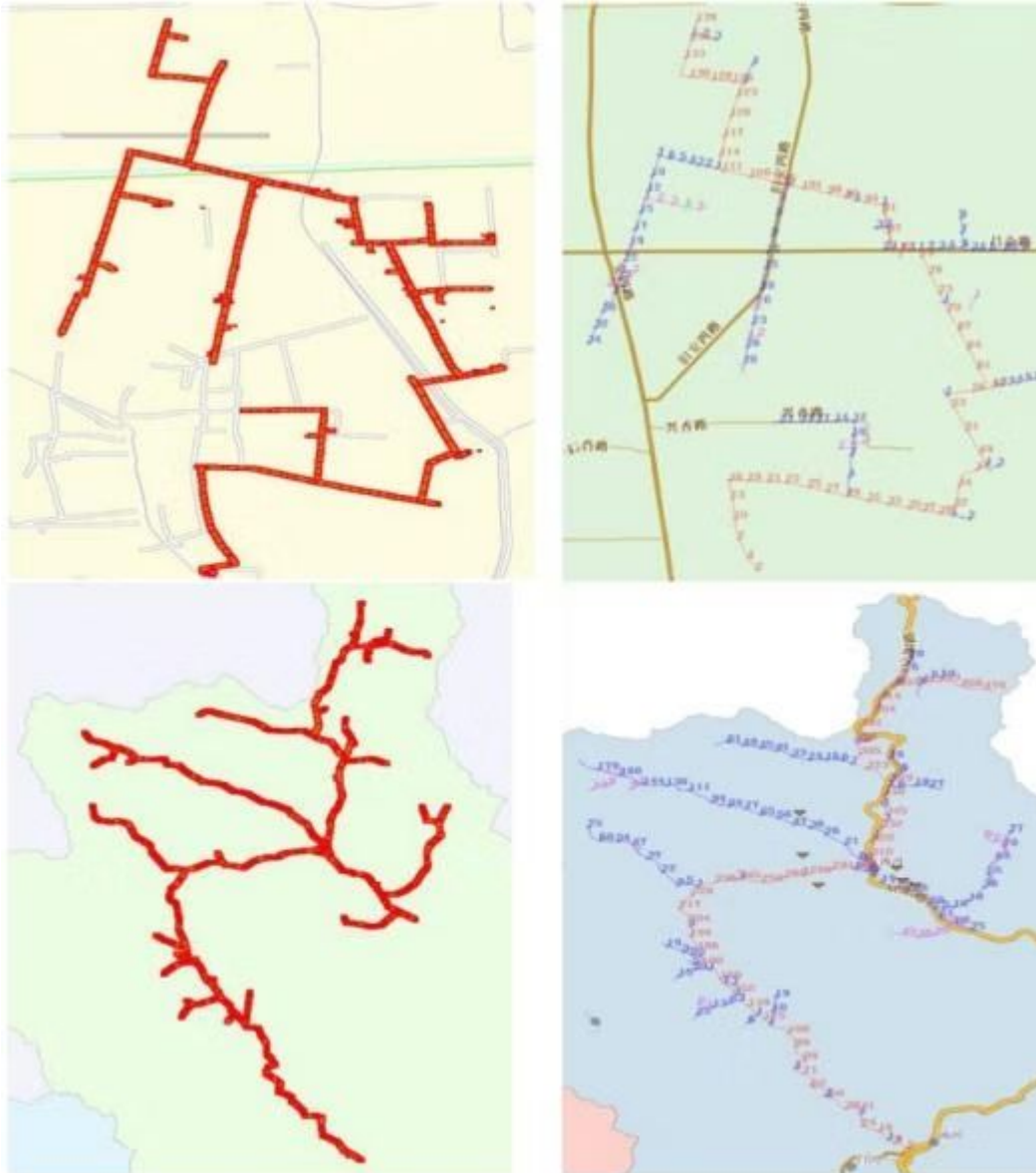
Для України

Підвищення класу напруги існуючих ліній — стратегічна альтернатива будівництву нових при обмеженнях коридорів. Особливо актуально для:

- Ліній через водні перешкоди (річки, водосховища)
- Урбанізованих ділянок без можливості нового землевідведення
- Зон з обмеженим доступом через розмінування
- Ліній у природоохоронних зонах

❗ Потенційна можливість: підвищення 110 кВ → 220 кВ на існуючих опорах у критичних перетинах.

Система моніторингу блискавок у розподільній мережі



Досвід Пекіна

Система локалізації блискавок для розподільної мережі (10 кВ) на базі **8 цифрових станцій виявлення**. Система точно та ефективно виконує якісний аналіз аварій від блискавок у розподільній мережі. Можливість виявляти:

- Пряме влучання блискавки в провід або опору
- Зворотний перекид з опори на провід
- Індуковані перенапруги від близьких ударів

Застосування для України

Система моніторингу блискавок є критично важливою для швидкого відновлення електропостачання після грозових відключень. Точна локалізація допомагає:

- Скоротити час виїзду аварійної бригади (знайти пошкоджений проліт)
- Диференціювати: пошкодження від блискавки vs. воєнні пошкодження
- Планувати встановлення ОПОТ та блискавкозахисного обладнання
- Вести статистику блискавкостійкості для прийняття рішень

Впровадження особливо актуальне для степових районів України з високою грозовою активністю.

Оцінка індукованих струмів у заземлювальних вимикачах ВН

Метод частотної області (FD)

Метод частотної області є альтернативою ЕМТР для оцінки індукованих струмів у заземлювальних вимикачах ВН. FD-метод вирішує рівняння Максвелла для всієї провідникової мережі, точно враховуючи електромагнітне та електростатичне зв'язування, вплив ґрунту та розподілені шляхи заземлення. Валідація з ЕМТР-інструментами підтвердила близьке збігання результатів.

Ключові висновки

- **Геометрія та фазування** домінують над параметрами заземлення
- Оптимальна послідовність фаз знижує індуковані напруги на 20–35%
- Вплив опору заземлення є менш визначальним, ніж прийнято вважати

Для України

Метод актуальний при проектуванні нових двоколових ліній 330–750 кВ та реконструкції підстанцій. Правильний вибір послідовності фаз при проектуванні мінімізує небезпеку для персоналу при проведенні ремонтних робіт під напругою.



FD-розрахунок

Оптимізація фаз

Умови безпеки

Розділ II. Оцінка стану та реконструкція повітряних ліній

PS2 · 24 СТАТТІ

Другий розділ охоплює **24 статті**, присвячені діагностиці, технічному обслуговуванню та реконструкції існуючих ліній. Для України це критично важливий напрям: перш ніж розпочати відновлення пошкоджених ліній, необхідно комплексно оцінити стан опор, фундаментів, ізоляторів та провідників. Сучасні методи — від дронів з ШІ до волоконно-оптичного моніторингу — дозволяють проводити безпечну діагностику навіть у небезпечних зонах.



Дистанційна інспекція

БПЛА з тепловізором та ШІ-розпізнаванням для безпечного огляду у зонах конфлікту



НДК фундаментів та бетону

Ультразвук, GPR, молоток відскоку — оцінка без розкопок



Супутниковий моніторинг

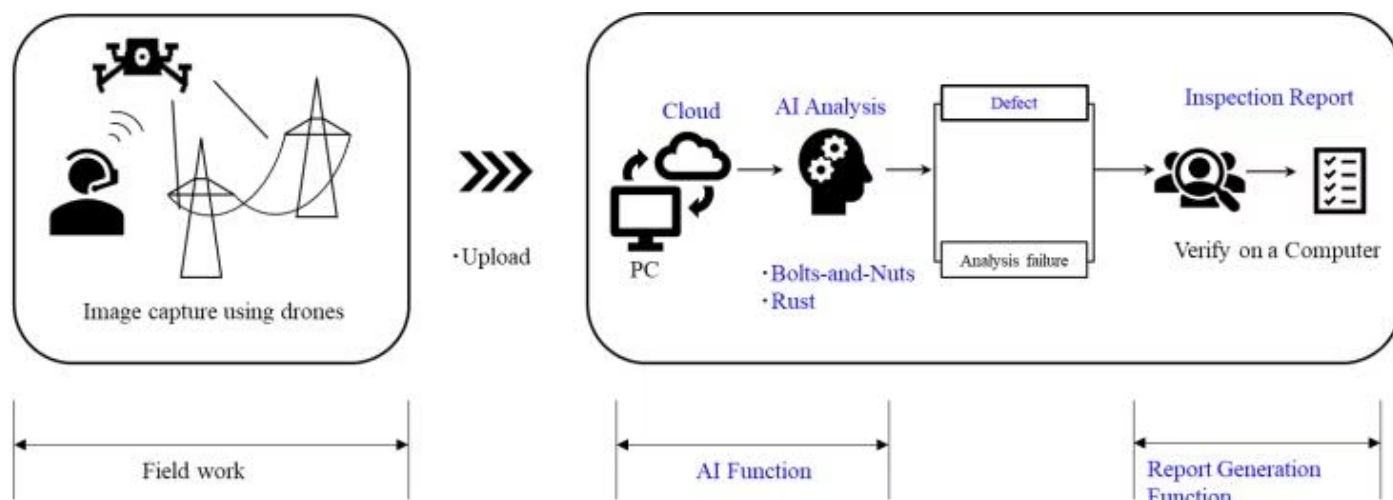
Контроль коридорів ПЛ з орбіти — єдиний варіант для недоступних зон



RCM-підхід

Ризик-орієнтоване обслуговування для оптимального розподілу обмежених ресурсів

Дрони + ШІ для виявлення дефектів болтових з'єднань опор



Система Tohoku Electric (Японія)

ШІ-система на основі зображень з дронів автоматично виявляє **ослаблені та відсутні болти** з точністю **~90%**. Очікувана економія — **140–475 хвилин на одну опору**, залежно від її розміру.

Тристадійний метод виявлення

1. **Ідентифікація об'єктів** — виявлення всіх болтових з'єднань на зображенні
2. **Класифікація стану** — нормальний / ослаблений / відсутній
3. **Визначення дефектів** — точна локалізація на опорі

Зйомка ведеться з **6 напрямків у форматі сітки** для повного охоплення всіх граней опори.

Для України

Дрони з ШІ — безпечний спосіб інспекції ліній у зонах бойових дій. Можливість виявляти дефекти болтових з'єднань, спричинені вибуховою хвилею, без ризику для персоналу. Подальша 90% точність може бути підвищена з накопиченням навчальних даних.

Оцінка стану композитних ізоляторів: Сучасні методи



Комплексна програма діагностики

Поєднання **польових методів**:

- Інфрачервона термографія (ІЧ)
- Ультрафіолетове виявлення корони (УФ)
- Детальний візуальний огляд

та **лабораторних тестів**:

- Вимірювання кута змочування поверхні
- Тест відриву (pull-off test)
- Барвникова пенетрація для виявлення тріщин

Система «Світлофор» — 6 класів стану

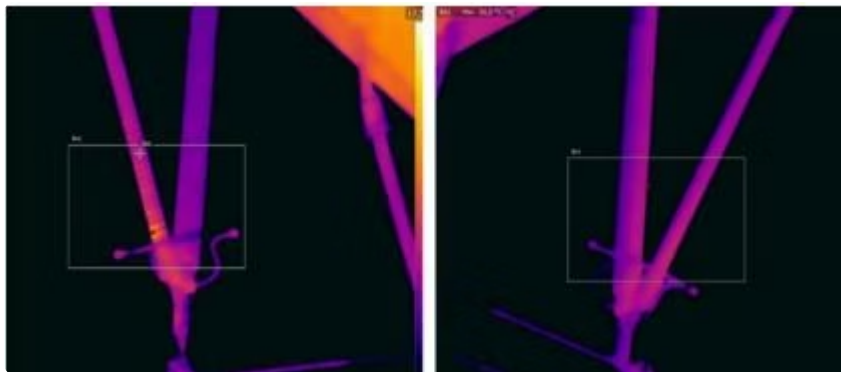
Запропонована цілісна система класифікації стану ізоляторів базується на системі «світлофор» із загальним описом їх стану та пропонуваними діями з технічного обслуговування. Це допомагає підприємствам краще планувати необхідні заходи з ТО.

Кейс: оцінка ізоляторів після **23 років** експлуатації показала значний розброс у стані в межах однієї партії.

Для України

Масова перевірка ізоляторів на пошкоджених лініях є обов'язковим першим кроком перед їх відновленням під напругою. Пошкодження від вибухової хвилі може порушити цілісність ізолятора без видимих зовнішніх ознак.

Коригувальне обслуговування ізоляторів: Досвід 12 європейських компаній



Консорціум 12 європейських TSO

RTE, Red Eléctrica, Svenska Kraftnät, TenneT, Energinet, APG, Statnett, E.ON, 50Hertz, Amprion, Fingrid — спільне дослідження **33 ізоляторів 8 конструкцій** після **40+ років служби**. Найбільший консорціум з вивчення відмов ізоляторів в історії CIGRE.

Домінуючий тип відмови

«Флешандер» — пробій по поверхні розділу стрижень/оболонка (flashunder). Виникає через деградацію поверхні розділу між склопластиковим стрижнем та гумовою оболонкою внаслідок проникнення вологи та часткових розрядів.

Ключовий висновок для практики

ІЧ-камера виявляє нагрів за **~1 рік до відмови**. Компанія «А» виявила нагрів $\sim 15^{\circ}\text{C}$ на одному ізоляторі на початку 2024 р. Наприкінці того ж року цей ізолятор перекрив. Порівнюючи ці дати, між виявленням та відмовою минув приблизно **1 рік**.

Для України

Регулярні ІЧ-інспекції (щонайменше щорічно) дозволяють запобігти відмовам ізоляторів на відновлених лініях. Рекомендація: пріоритетна ІЧ-інспекція ізоляторів, встановлених до 2000 р. на лініях 110+ кВ.

Корозія фундаментів опор: Індекс ризику та методи захисту

290K

Опор POWERGRID (Індія)

182 000 км ліній — найбільша у світі програма управління корозією фундаментів

20%

Втрата несучої здатності

Важка корозія стійок та розкосів знижує несучу здатність на 10–20%

5

Категорій ризику CRI

Від низького до критичного за матрицею корозійного ризику

Індекс корозійного ризiku (CRI)

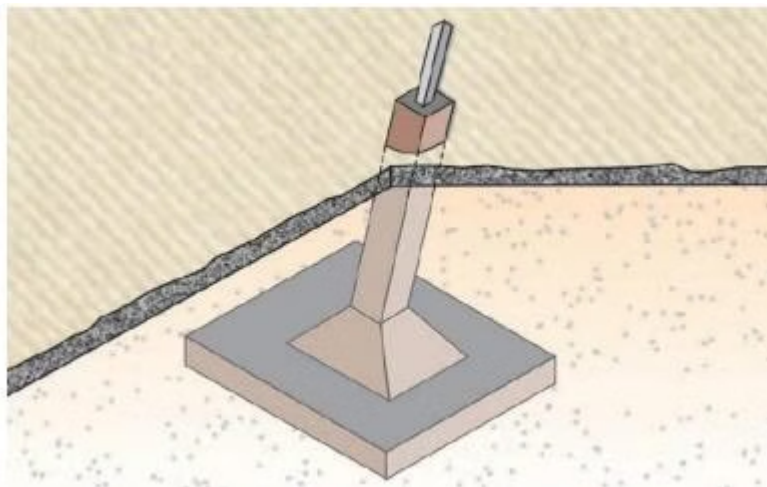
Інтегрує: вразливість опори, вплив середовища, стан ґрунту, якість покриття та вік активу. Результат — класифікація на **низький / середній / високий / дуже високий / критичний** ризик з диференційованими графіками інспекцій та заходами захисту.

Для України

Опори в зонах затоплення (прибережні райони річок), з пошкодженням гальванічним покриттям від вибухової хвилі або тривалого підтоплення потребують **пріоритетної перевірки**. Розробка CRI-методології на основі GIS-даних дозволить систематично обслуговувати 170 000+ опор.



НДК фундаментів залізобетонних опор



Комплексна методологія НДК

Неруйнівний контроль є переважним для оцінки стану фундаментів, оскільки дозволяє оцінити якість бетону, стан армування та механізми деградації з мінімальним порушенням критичних систем передачі навантажень.

- **Візуальний огляд** — виявлення видимих тріщин, відколів
- **Молоток відскоку (Шмідта)** — поверхнева міцність
- **UPV** — ультразвукова імпульсна швидкість по всьому перерізі
- **GPR (георадар)** — розташування арматури та порожнин
- **Метод SONREB** — комбінована оцінка (UPV + молоток відскоку)

Результати кейсу

13 залізобетонних колон у хімічно агресивному середовищі — виявлено поздовжні тріщини та корозію сталевих з'єднань без розкопок. Підтверджена кореляція між UPV, молотком Шмідта та реальною міцністю бетону.

Для України

НДК фундаментів — **обов'язковий перший етап** перед відновленням пошкоджених опор. Дозволяє:

- Виявити приховані пошкодження від вибухової хвилі
- Прийняти рішення: ремонт vs. повна заміна фундаменту
- Уникнути обвалення відновленої опори через непомічений дефект

Тензометрія при прототипних випробуваннях опор 400–765 кВ



Кількісна методологія

П'ять опор (400 кВ Quad та 765 кВ DA/DB/DC/DD) оснащені **38–70 тензодатчиками** — реальний моніторинг деформацій під час прототипних випробувань. Інтегрована порогова система моніторингу дозволила своєчасно виявляти потенційне перевантаження та підвищила впевненість у прогресі випробувань, ефективно запобігаючи непотрібним повторним тестам.

Результати верифікації

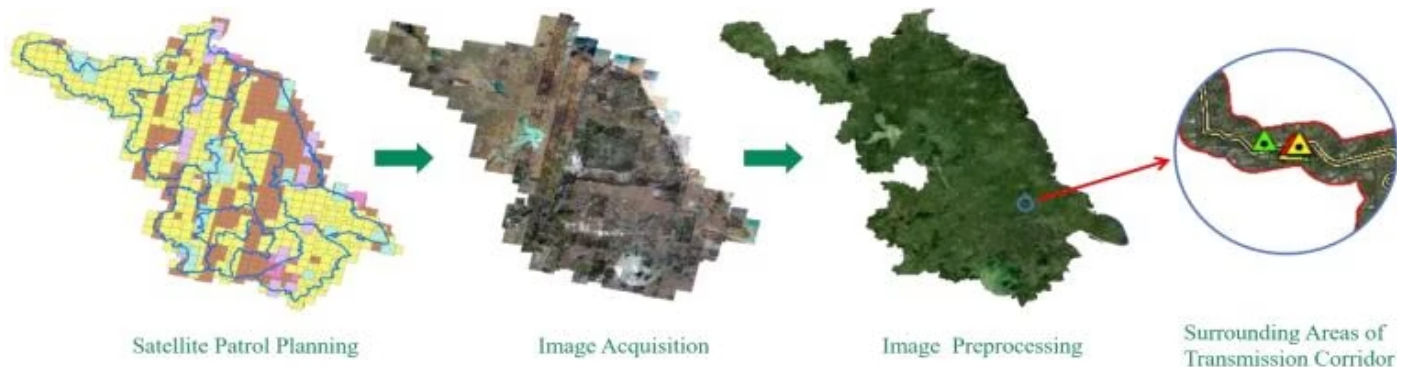
- Сильна кореляція з аналітичними результатами PLS-Tower для ніг та траверс
- Виявлено відхилення у розкосах — потребують уточнення моделей
- Тензодатчики дозволили уникнути 3 повторних випробувань

Для України

При розробці нових стандартних типів опор для відновлення ліній 110–330 кВ обов'язкові прототипні випробування з тензометрією. Це дозволить:

- Підтвердити проектні рішення до масового виробництва
- Оптимізувати конструкцію та зменшити витрату металу
- Забезпечити відповідність міжнародним нормам (IEC 60652)
- Скоротити цикл розробки нового типу опори з 2 років до 6–8 місяців

Супутниковий моніторинг коридорів ПЛ: Досвід Китаю



Система Цзянсу (Китай)

Інтеграція супутникових знімків **0,5 м роздільності** (Gaofen-4A), БПЛА та камер на опорах — охоплює **15 000 км ліній, 3 роки** стабільної роботи. Система управління коридором передачі ефективно зменшує навантаження на рутинне технічне обслуговування та підвищує операційну ефективність електромережі.

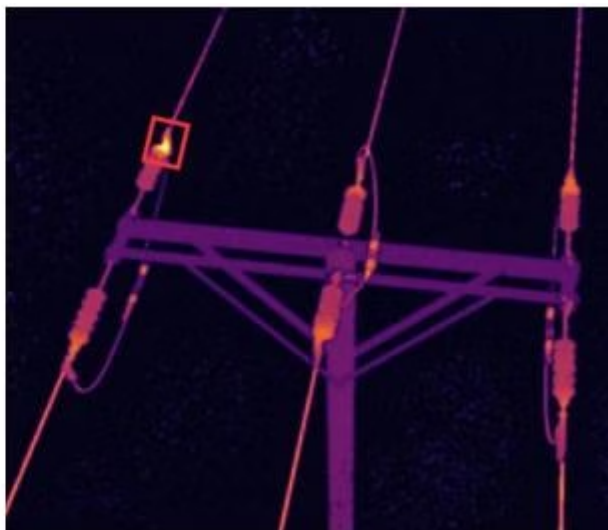
Алгоритм крос-масштабного зіставлення

Алгоритм використовує **Vision Transformer (ViT)** та метрику подвійних ознак для поєднання супутникових та БПЛА-зображень різного масштабу — вирішує задачу автоматичної ідентифікації змін у коридорі без ручного аналізу кожного знімку.

Для України

Супутниковий моніторинг — **єдиний безпечний спосіб** контролю ліній у зонах активних бойових дій. Дозволяє визначити пошкоджені прольоти та підготувати схему відновлення ще до введення перемир'я. Рекомендація: запустити програму супутникового моніторингу 750 кВ магістралей негайно.

Автономні БПЛА з тепловізором для інспекції ЛЛ



Інтегрована система IDECO (Йорданія)

БПЛА з тепловізійною камерою, оснащений алгоритмом **Pure Pursuit** для відстеження траєкторії та фільтром Калмана для компенсації шуму GPS та електромагнітних завад від ліній. Симуляція показала, що дрон може слідувати запланованому маршруту з доброю точністю, а теплова обробка чітко ідентифікує перегріті компоненти.

Методи виявлення дефектів

- **Порогова модель** — явний перегрів ($>5^{\circ}\text{C}$ вище норми)
- **Статистична модель** — аномалії відносно середнього по лінії
- **РСА-модель аномалій** — ранні стадії без великих навчальних наборів

Порівняння з традиційними методами

Параметр	Традиційна інспекція	БПЛА+ІЧ
Безпека персоналу	Ризик	Без ризику
Час на 100 км	5–7 днів	8–12 годин
Виявлення раннього дефекту	Ні	Так
Документація	Ручна	Автоматична

DLR з урахуванням сонячної радіації: Валідація на різних рельєфах

Дослідження TenneT/RWTH Aachen

Включення часового профілю сонячної радіації (замість постійних 900 Вт/м^2) збільшує пропускну здатність на **43%** для ліній 400 кВ та **46%** для ліній 220 кВ. Ефект найбільш виражений у нічний час та взимку, коли фактична радіація нижча за постійно прийняте значення 900 Вт/м^2 .

Висновки щодо безпеки

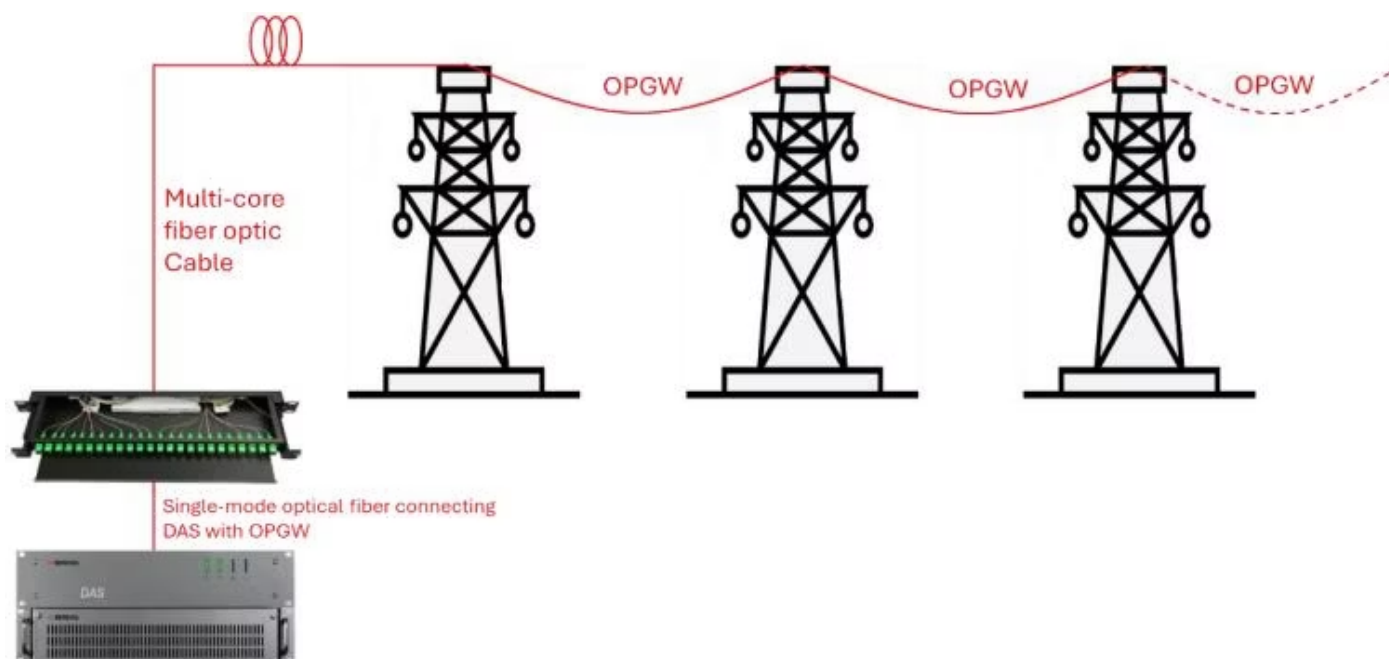
Навіть у гірській місцевості методологія DLR є **безпечною** — теплові ліміти не перевищуються навіть при аварії N-1. Це спростовує поширений аргумент проти DLR у складному рельєфі.

Додаткова цінність для України

Впровадження DLR з урахуванням часового профілю сонячної радіації дає додаткові **5–10%** пропускну здатності порівняно зі стандартним DLR. При застосуванні на **5 000 км** магістральних ліній — еквівалент будівництва 1–2 нових ліній 330 кВ.



DAS/OPGW для моніторингу вітру та DLR



Система TenneT (Нідерланди)

Розподілена акустична сенсорика (DAS) через OPGW-кабель вимірює швидкість вітру вздовж усієї лінії **380 кВ (68 км)** з одного пункту. DAS-оцінка швидкості вітру у поєднанні з логарифмічним профілем вітру та інформацією про рельєф може забезпечити вхідні дані для розрахунків DLR. Екстрапольована швидкість вітру добре узгоджується з еталонними вимірюваннями від датчиків DLR на основі вібрації.

Ключова перевага та застосування для України

Система використовує **вже наявний OPGW-кабель** без додаткових датчиків на кожній опорі — потрібен лише DAS-інтерогатор на підстанції.

Більшість ліній 110+ кВ в Україні вже обладнані OPGW. Це означає, що впровадження DAS-DLR вимагає лише:

- Установки інтерогатора на підстанції (~50 000–100 000 EUR)
- Програмного забезпечення обробки сигналів
- Інтеграції з EMS/SCADA

Порівнянно з традиційними датчиками DLR (~5 000 EUR/опору × 500 опор = 2,5 млн EUR) — **на порядок дешевше.**

ШІ для проектування трас та розміщення опор ПЛ



1

Макро-трасування

Навчання з підкріпленням + теорія графів — оптимальний маршрут між підстанціями з урахуванням обмежень

2

Мікро-сайтинг

Генетичні алгоритми + семантична сегментація LiDAR — точне розташування кожної опори

3

Проектування опор

Топологічна оптимізація — генеративний дизайн з мінімальною масою при заданих навантаженнях

4

Вибір провідника

Багатоцільовий аналіз Парето — оптимальний компроміс між масою, втратами та вартістю

Великі мовні моделі (LLM) автоматично перевіряють відповідність нормативним вимогам (ASCE, Eurocode, IEC) — скорочуючи час перевірки **з тижнів до годин**. Для України ААД критично важливий для швидкого проектування нових ліній при дефіциті досвідчених інженерів.

Технічне обслуговування на основі надійності (RCM)

Досвід POWERGRID (Індія)

RCM-фреймворк для **278 509 опор 564 ліній** — найбільша у світі система ризик-орієнтованого обслуговування ПЛ. Перехід від планово-попереджувального до ризик-орієнтованого обслуговування.

Матриця ризиків RCM

Ймовірність відмови (Pf) × Вплив відмови (If) → 5 категорій ризику → диференційовані графіки інспекцій:

- **Критичний ризик** — інспекція щоквартально
- **Дуже високий** — піврічна інспекція
- **Середній** — річна інспекція
- **Низький** — інспекція раз на 3 роки

RCM-фреймворк забезпечує оптимізоване планування інспекцій, пріоритезовані заходи з технічного обслуговування, ефективне використання ресурсів та зниження незапланованих відключень, підвищуючи таким чином надійність, безпеку та стійкість великих систем передачі електроенергії. **Для України:** RCM дозволяє оптимально розподілити обмежені ресурси, спрямовуючи їх на відновлення найкритичніших ліній при мінімальному персоналі.

Управління старінням фундаментів: Досвід RTE (Франція)



Програма «Plan Foundations»

До **2040 р.** у Франції **85-річного** віку досягнуть лінії, збудовані після Другої світової війни. Масштабне дослідження (**455 зразків бетону** у 2023–2024 рр.) виявило несподівану популяцію деградованих фундаментів, відмінну від простого аналізу за критеріями: вік, розташування та тип ґрунту. Ця популяція становила близько **10%** загальної кількості бетонних зразків і мала границю міцності нижче нормативних вимог.

Три методи посилення фундаментів

- **Розширення бетонної основи** — збільшення підшви фундаменту для широких опор
- **Збільшення армування** — додаткові сталеві стрижні або обойма
- **Збірні конструкції** — для вузьких кутових опор у стислих умовах

Для України

Більшість ліній **1960–1980-х рр.** мають аналогічні проблеми зі старінням фундаментів. При цьому їх стан додатково погіршений воєнними пошкодженнями. Рекомендується негайно розпочати програму масового відбору зразків бетону за методологією RTE.

Геотехнічні дослідження: Ризики неякісного виконання

Кейс ISA Energia (Бразилія)

Помилки у виконанні SPT-буріння призвели до **заниженого проектування фундаментів** — необхідна повторна геотехнічна кампанія, перегляд проекту та суттєве збільшення бюджету. Аналіз отриманих даних виявив значні помилки у виконанні геотехнічних свердловин для кожної споруди, що призвело до необхідності проведення нової геотехнічної кампанії, перегляду цивільного проекту та графіку проекту.

Ключовий висновок

Якість геотехнічних досліджень безпосередньо визначає **надійність фундаментів та вартість проекту** протягом усього 50–80-річного терміну служби. Помилки на цьому етапі неможливо виправити дешево після початку будівництва.

Для України: обов'язкові вимоги

- Верифікація геотехнічних даних перед проектуванням нових фундаментів
- Незалежний контроль якості буріння та відбору зразків
- Порівняльна перевірка: нові дані vs. архівні проектні дані 1960–1980-х рр.
- Ліцензування геотехнічних лабораторій за міжнародними стандартами

Стохастична оцінка втомної довговічності провідників

Метод NBD (RTE, Франція)

Від'ємний біноміальний розподіл (NBD) + ланцюги Маркова для моделювання стохастичної поведінки втоми алюмінієвих дротів ACSR під дією еолових вібрацій. Метод може використовуватися в рамках управління активами, коли польових спостережень небагато і важко проводити кількісний аналіз ризиків. Підхід дозволяє оцінити залишковий ресурс провідника на основі **лабораторних даних** без тривалих польових спостережень.

Значення для управління активами

Метод особливо цінний коли:

- Відсутня повна польова документація (типово для пострадянських ліній)
- Невідомий реальний час роботи під навантаженням
- Є обмежені дані про інтенсивність еолових вібрацій

Для України

Актуально для оцінки залишкового ресурсу провідників на лініях, що зазнали механічних пошкоджень від ударної хвилі або тривалої вібрації через зміну умов кріплення. Дозволяє ранжувати провідники за ризиком втомного руйнування без масових натурних випробувань.

Моделювання відмов ПЛ при комбінованих кліматичних загрозах

Методологія TNEI/National Grid (Великобританія)

Послідовна Монте-Карло симуляція (SMCS) для оцінки комбінованого впливу двох загроз: **теплові хвилі** (відпал алюмінію → зниження міцності) та **штормові вітри**. Провідник, ослаблений тривалим впливом екстремального тепла, може бути значно більш вразливим до руйнування під час наступного буревію, ніж можна передбачити, розглядаючи кожну загрозу окремо.

Висновки та застосування

Комбінований вплив кількох загроз значно **перевищує суму окремих ризиків** — необхідний мультизагрозний підхід при оцінці надійності системи. Традиційні детерміністичні методи систематично **недооцінюють** ймовірність каскадних відмов.

Для України

Особливо актуально в контексті:

- Зміни клімату — зростання частоти теплових хвиль
- Воєнних пошкоджень — ослаблені конструкції більш вразливі до кліматичних загроз
- Необхідності переоцінки надійності ліній з урахуванням обох факторів

Руйнування опор 765 кВ від екстремального вітру: Аналіз ВІДМОВИ



Кейс ПАР (жовтень 2023)

Три опори типу 703В (**765 кВ**, лінія 291 км) зруйновані штормом — швидкість вітру перевищила проектні параметри (**32 м/с**). Аналіз програмного забезпечення показав, що вітрові навантаження, що перевищують проектні параметри, були відповідальними за обрушення опор, оскільки жодних інших аномалій, пошкоджень або відмов елементів опор або лінійної арматури, які могли б сприяти інцидентам, виявлено не було. Відтягнення витягнуті з фітингів через **дефекти лиття**.

Системні висновки

Зміна клімату призводить до перевищення проектних вітрових навантажень, що вимагає:

- Перегляду нормативних вітрових карт для нових проектів
- Перевірки якості відтягнень та фітингів на існуючих лініях
- Введення підвищених коефіцієнтів надійності для критичних ліній

Для України

Аналіз відмов від екстремального вітру необхідний для вдосконалення проектних норм при відновленні. Особливо важливо перевірити якість відтягнень та фітингів на лініях 330–750 кВ.

Моніторинг ожеледних навантажень: Датчики LoadTroll на 420 кВ лінії



Норвезький досвід (Statnett/Norconsult)

Датчики LoadTroll на підвісних ізоляторах нової **420 кВ лінії в гірській місцевості** — безперервний моніторинг ожеледних навантажень та виявлення галопування. Ця робота демонструє, як інноваційна інтеграція датчиків на нових лініях може давати цінні довгострокові набори даних, уточнювати існуючі розрахункові моделі та підтримувати більш стійке інфраструктурне планування в умовах мінливого клімату.

Калібрування моделей

Поєднання польових вимірювань з **атмосферним моделюванням високої роздільності (NWP)** для уточнення проектних навантажень. Дані дозволяють:

- Перевірити консервативність або недостатність нормативних льодових навантажень
- Виявити ділянки з галопуванням для встановлення демпферів
- Оптимізувати проектні параметри наступних ліній

Для України

Карпатські лінії потребують аналогічного моніторингу ожеледних навантажень — норми 1970-х рр. не відображають сучасні кліматичні реалії. Рекомендація: оснастити датчиками LoadTroll ключові гірські ділянки ліній 110–330 кВ.

Акустичне моделювання шуму корони ПЛ



Методологія (Сербія/EMS)

Представлення ПЛ як **акустичного джерела** в програмному забезпеченні шумового картування (CNOSSOS-EU) — враховує рельєф, рослинність та забудову. Верифікація через порівняння з польовими вимірюваннями демонструє значний прогрес в акустичному моделюванні повітряних ліній передачі. Методологія підтримує обґрунтоване прийняття рішень під час фаз планування та реконструкції.

Для України

При відновленні ліній поблизу населених пунктів обов'язкова оцінка акустичного впливу шуму корони для відповідності екологічним нормам. Особливо актуально при:

- Рекондукторингу з підвищенням напруги
- Будівництві нових ліній у межах 200 м від забудови
- Переведенні ліній на вищий клас напруги

Методологія CNOSSOS-EU є обов'язковою в ЄС і буде вимагатися в рамках євроінтеграції України.

Старіння RTV-покриттів ізоляторів та аудіальний шум провідників 765 кВ

Деградація RTV-покриттів (GCCIA)

Дослідження ізоляторів з RTV-покриттям після **17 років служби** в умовах морсько-пустельного забруднення. Природньо постарілі польові ізолятори показали сильну деградацію: середній $\tan \delta$ на боці ВН сягнув **~70% (сухий)** та **~100% (вологий)** проти $<3\%$ для нових покриттів. Метод діагностики: вимірювання $\tan \delta$ при 3/6/9 кВ — класифікація залишкової ефективності.

Для України: Ізолятори на промислових та приморських ділянках потребують регулярної перевірки $\tan \delta$. Перевищення 50% — сигнал до негайної заміни покриття.

Аудіальний шум провідників 765 кВ (NTCSA, ПАР)

Порівняння двох конфігурацій для лінії 765 кВ: **6×IEC 315 (23,9 мм)** та **6×Tern (27 мм) ACSR**. Менший діаметр дає економію **~5,4 млн USD** на 2100 км, але підвищує рівень шуму корони. Через ретельне планування, цілеспрямовані конструктивні заходи та дотримання норм EPRI та SANS 10103, провідники меншого діаметру можна застосовувати без порушення технічних вимог. **Для України:** при виборі провідників для нових ліній 330–750 кВ необхідна оцінка акустичного впливу поряд з технічними характеристиками.

Розділ III. Сталий розвиток та кліматичні зміни

PS3 · 17 СТАТЕЙ

Третій розділ охоплює **17 статей**, присвячених кліматичній адаптації, екологічній стійкості та циркулярній економіці в галузі ПЛ. Для України цей напрям є стратегічно важливим: відновлення інфраструктури є унікальною можливістю одразу застосувати кращі практики сталого розвитку та побудувати більш стійку до кліматичних змін систему, ніж та, що була зруйнована.



Ожеледь та кліматичні навантаження

Нові моделі ожеледних та вітрових навантажень з урахуванням змін клімату



Циркулярна економіка

Повторне використання опор та провідників, оцінка повного екологічного циклу



LCA та CO₂

Оцінка вуглецевого сліду при виборі між ПЛ та кабелем, між різними типами провідників

Виявлення ожеледі на ПЛ: Розподілена волоконно-оптична сенсорика

Технологія BOTDR/DSTS

Система на основі OPGW-кабелю виявляє ожеледь через аналіз стандартного відхилення **зсуву Бріллюєнівської частоти (BFS)** — без додаткових датчиків вздовж лінії. Польова валідація підтвердила: BFS чітко реагує на різні фази льодоутворення; стандартне відхилення різко зростає під час активного обледеніння або танення через фізичну нестабільність.

Переваги та застосування для України

Моніторинг ведеться на відстані **кількох кілометрів з одного пункту** — особливо цінно для важкодоступних ділянок.

Ожеледні явища в Карпатах та на сході України — критична сезонна загроза для ПЛ взимку.

Система BOTDR/DSTS через OPGW:

- Не потребує нових датчиків — лише OPGW-кабель вже існує
- Виявляє початок обледеніння за 1–2 години до критичного навантаження
- Дозволяє превентивно вимкнути лінію або застосувати плавлення льоду
- Особливо важливо для ізольованих гірських ділянок

Вплив клімату на льодові навантаження: Тенденції та прогнози



Дослідження Нідерландів (1991–2021)

Статистичний аналіз **30 років** метеоданих показав: потепління клімату зменшує частоту ожеледних явищ, але **мокрый сніг залишається значною загрозою**. Оскільки підвищення температури та збільшення опадів відіграють компенсуючу роль у виникненні льодяного дощу та мокрого снігу, наразі можливий лише якісний прогноз. Очікується, що в майбутні десятиліття обидва явища виникатимуть рідше.

Для України: перегляд нормативів

Необхідний перегляд нормативних льодових навантажень з урахуванням кліматичних змін при проектуванні нових та відновлених ліній. Рекомендації:

- Аналіз статистики льодових аварій за 1991–2024 рр.
- Регіоналізація льодових карт з урахуванням кліматичних тенденцій
- Введення підвищених коефіцієнтів надійності для Карпат та Прикарпаття
- Моніторинг реальних навантажень на репрезентативних ділянках

Вплив шквалів (downburst) на електричну надійність ПЛ

Критичний висновок дослідження

Порушення міжфазних кліренсів може виникати при інтенсивності вітру **нижче порогу структурної відмови** — тобто електрична надійність може бути порушена раніше, ніж конструкція зруйнується. Метод: поєднання CFD (моделювання поля вітру шквалу) та MCE (структурна відповідь) для **9-прольотної секції 500 кВ**.

Наслідки для проектування

Традиційне проектування опор за структурними критеріями може недооцінювати ризик електричних відмов від шквалів. Необхідні нові підходи:

- Перевірка кліренсів при динамічному навантаженні від шквалу
- Урахування горизонтального прогину проводів у розрахунках кліренсу
- Встановлення демпферів на прольотах у шквалонебезпечних зонах

Для України

Актуально для степових районів (Херсонська, Запорізька, Миколаївська обл.) з частими шквалами. При відновленні ліній у цих районах — обов'язкова перевірка кліренсів при шквальному навантаженні.

Циркулярна економіка: Повторне використання опор при перетрасуванні ліній



60%

Скорочення закупівлі нових опор

Досвід ISA Intercolombia при перетрасуванні через кліматичні ризики

\$130K

Економія за перший рік

Пряма економія на закупівлі нових сталевих опор

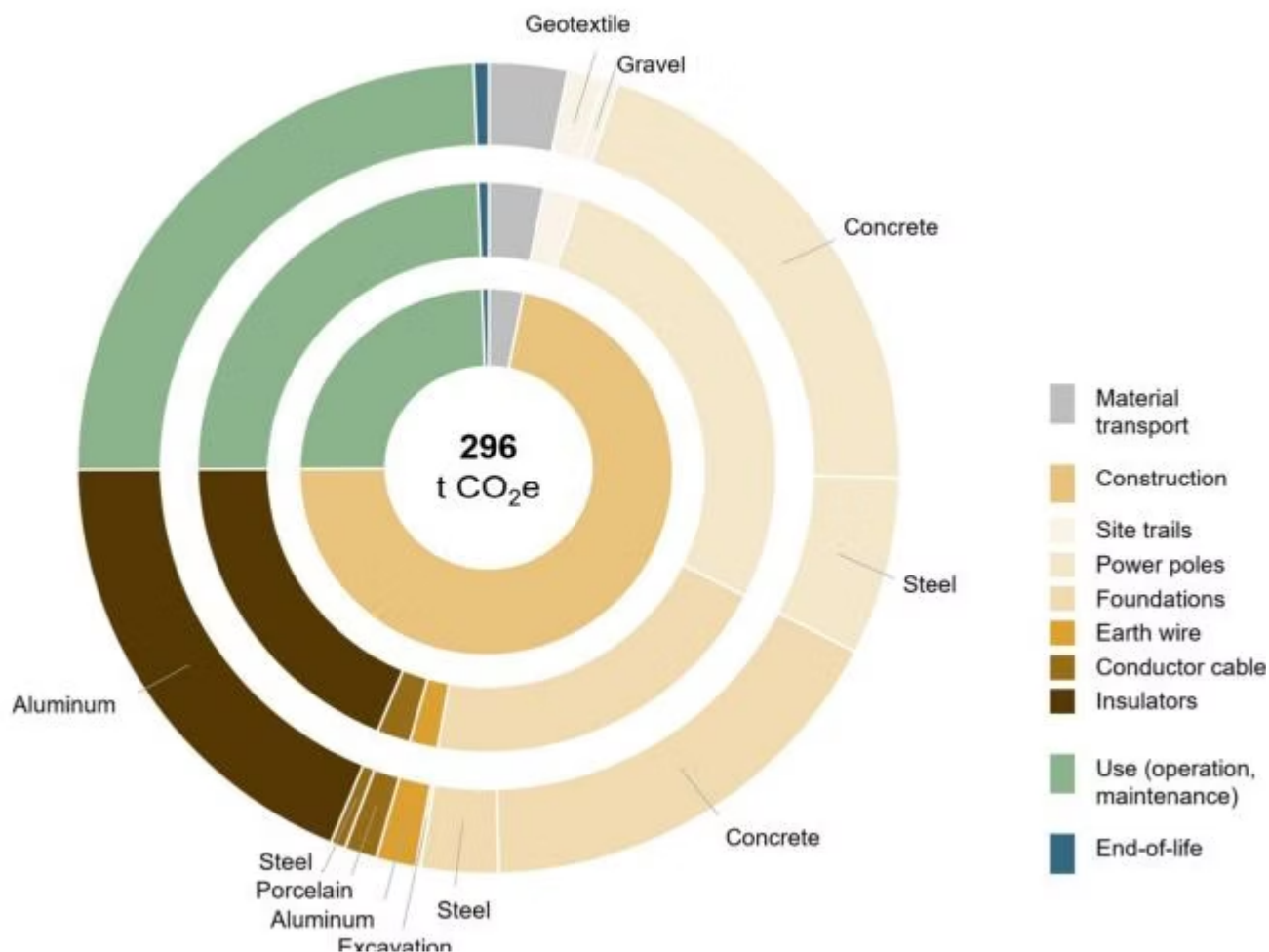
175т

Уникнення CO₂

Скорочення викидів за перший рік завдяки відсутності виробничих циклів

Для України: Демонтовані сталеві опори з пошкоджених ділянок можуть бути повторно використані після технічної оцінки — тензодатчики, УЗ-контроль та перевірка покриття. При масштабному відновленні (сотні км ліній) потенціал повторного використання становить **тисячі опор**, що скорочує витрати на сотні мільйонів гривень та прискорює виконання.

Оцінка життєвого циклу обладнання ПЛ 110 кВ



Дослідження Axpo Grid (Швейцарія): LCA 110 кВ

Порівняльна оцінка за **80 років** (ПЛ) та **50 років** (кабель):

- **ПЛ:** 296 т CO₂e/км — «гарячі точки»: алюміній провідників та бетон опор
- **Кабель:** 461 т CO₂e/км — «гарячі точки»: полімерна ізоляція та мідь

ПЛ має **на 36% нижчий** вуглецевий слід, ніж кабель при однаковій пропускній здатності.

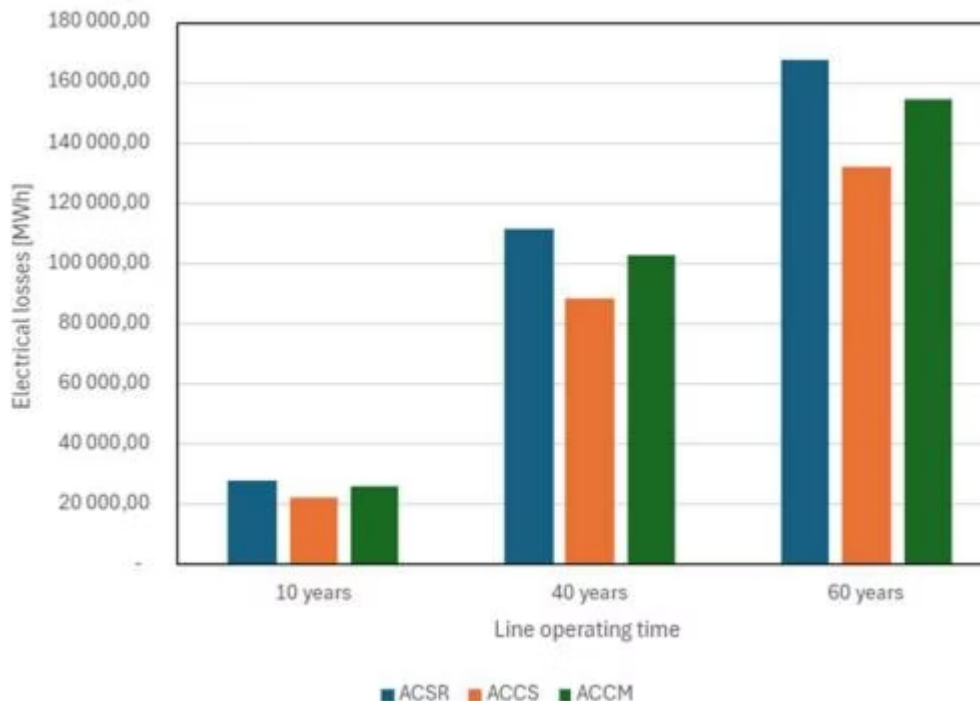
Стратегічні висновки для України

При виборі між ПЛ та кабелем для відновлення слід враховувати **повний вуглецевий слід**, а не лише капітальні витрати. Перевага ПЛ стає ще більшою при:

- Застосуванні провідників ACCC/ACSS (нижчі втрати протягом 50 років)
- Використанні сталевих опор замість залізобетонних
- Виборі алюміній-рециклінгу замість первинного алюмінію

Зобов'язання України у сфері кліматичної нейтральності вимагають врахування LCA при всіх великих інфраструктурних рішеннях.

Сталий кінець життєвого циклу провідників з композитним осердям



Порівняльний аналіз: ACSR vs. ACCS vs. ACCM

Незважаючи на те, що виробництво вуглецевого волокна є енергоємним і призводить до підвищеного екологічного навантаження на етапі виробництва, **зниження втрат електроенергії** протягом десятиліть експлуатації може компенсувати ці початкові недоліки. Провідники з РМС-осердям при однаковому перерізі алюмінію мають:

- Менше провисання → вищий рейтинг при тій же температурі
- Нижчий питомий опір алюмінію → менші втрати
- Більший термін служби → нижчий середній CO₂ на рік

Переробка вуглецевого волокна

Методи утилізації РМС-осердь:

- **Механічна переробка** — подрібнення та використання як наповнювача
- **Хімічна переробка** — відновлення волокна з матриці; найкраща якість
- **Термічна переробка** — піроліз; середня якість відновленого волокна

Для України

При рекондукторингу слід вибирати провідник з урахуванням повного екологічного циклу та плану утилізації наприкінці терміну служби — вимога майбутніх євростандартів.

Синтез: Порівняльна пріоритизація технологій для України



Систематизація 83 публікацій CIGRE B2 2026 дозволила виявити **12 ключових технологій**, що мають найвищий потенціал для відновлення та модернізації енергосистеми України. Пріоритизація базується на трьох критеріях: швидкість впровадження, вплив на пропускну здатність та безпеку персоналу.

Пріоритети впровадження технологій для енергосистеми України

1

Негайні заходи (0–2 роки)

- Дрони+ШІ для безпечної інспекції у зонах конфлікту (~90% точності виявлення дефектів)
- НДК фундаментів перед відновленням опор (GPR, UPV, молоток Шмідта)
- DLR на існуючих лініях (+30–40% пропускна здатність без капвкладень)
- Компактне обладнання для натягування проводів (~30 кг проти 2,5 т)

2

Середньострокові (2–5 років)

- Рекондукторинг HTLS/ACSS на критичних перетинах (+50–100% ампасіті)
- Апгрейд напруги на існуючих опорах де дозволяє конструкція
- Цифровий двійник для управління відновленням (економія 4 міс/проект)
- Система моніторингу ожеледі через OPGW/BOTDR в Карпатах

3

Стратегічні (5+ років)

- AI-проекування нових опор (скорочення маси на 10–15%, часу проектування у 4 рази)
- LiDAR-оцінка кліренсів на всій мережі 110+ кВ
- Перегляд нормативів льодових та вітрових навантажень (кліматична адаптація)
- Впровадження циркулярної економіки (повторне використання 60% опор)

Висновки: Ключові технологічні рішення для відновлення енергосистеми України

Найвища пріоритетність

Чотири технології забезпечують максимальний ефект при мінімальних термінах впровадження:

- **Рекондукторинг HTLS** — +50–100% пропускна здатність без нових коридорів
- **DLR** — +30–40% миттєво на існуючій інфраструктурі
- **Дрони+ШІ** — безпечна інспекція у зонах конфлікту
- **Цифровий двійник** — координація масштабного відновлення

Системний підхід та міжнародний досвід

Поєднання **фізичної модернізації** (нові провідники, опори) з **цифровізацією** (моніторинг, ШІ, BIM) є необхідною умовою стійкого відновлення. Не можна обирати лише одне.

83 статті CIGRE B2 2026 охоплюють досвід понад **30 країн** — Німеччини, Франції, Нідерландів, Норвегії, Індії, Бразилії, Китаю, Японії та інших. Україна може **адаптувати перевірені рішення** без повторення помилок. Особливо цінним є досвід Косово — постконфліктної країни зі схожою структурою мережі.

- ✓ CIGRE B2 2026 є унікальним ресурсом знань, що з'явився саме тоді, коли Україна найбільше його потребує для відновлення.

Словник термінів, скорочень та аббревіатур

ДОВІДКОВИЙ РОЗДІЛ

Цей розділ містить систематизований глосарій термінів, скорочень та аббревіатур, що використовуються у 83 публікаціях CIGRE B2 2026 та в цьому аналітичному документі. Терміни організовані за тематичними групами для зручності пошуку. Всі визначення адаптовані для використання в контексті передачі електроенергії та відповідають міжнародним стандартам IEC, CIGRE та IEEE.

Частина 1

Провідники та матеріали: ACSR, ACSS, HTLS, ACCC, PMC, CFRP, IPS та інші

Частина 2

Системи моніторингу та технології: DLR, DAS, OPGW, BOTDR, LiDAR, SCADA, BIM

Частина 3

Методи аналізу та проектування: MCE, CFD, AI/ШІ, ML, RL, LLM, AAD, SPT

Частина 4

Електроенергетика та стандарти: ПЛ/ОНЛ, TSO, RCM, SIL, CAPEX, OPEX, LCA, GWP

Частина 5

Діагностика та НДК: NDT, UPV, GPR, SONREB, ІЧ, УФ, ESDD, $\text{tg}\delta$, RTV SiR

Частина 6

Ключові терміни: рекондукторинг, провисання, кліренс, ампасіті, флешандер, галопування

Абревіатури провідників та матеріалів

Абревіатура	Розшифровка	Опис та застосування
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced	Алюмінієвий провідник зі сталевим осердям — найпоширеніший тип провідника ПЛ у світі та в Україні
ACSS	Aluminium Conductor Steel Supported	Провідник з відпаленим алюмінієм та сталевим осердям; допускає температуру до 250°C; ключова технологія рекондукторингу
HTLS	High Temperature Low Sag	Провідник з високою робочою температурою та малим провисанням; загальна назва класу (ACSS, ACCC, GTACSR тощо)
ACCC	Aluminium Conductor Composite Core	Провідник з композитним осердям з вуглецевого волокна; нижче провисання, вищі механічні характеристики
AAAC	All Aluminium Alloy Conductor	Провідник з алюмінієвого сплаву без сталевих осердь; краща корозійна стійкість
ACCS	Aluminium Conductor Composite Single	Провідник з одиночним РМС-осердям; компромісний варіант між ACSR та ACCC
ACCM	Aluminium Conductor Composite Multistrand	Провідник з багатожильним РМС-осердям; підвищена гнучкість та надійність осердя
PMC	Polymer Matrix Composite	Полімерний матричний композит — вуглецеве волокно в епоксидній смолі; матеріал осердя ACCC/ACCS
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	Вуглецево-волоконний полімер; синонім РМС у контексті провідників
IPS	Inter-Phase Spacer	Міжфазна розпірка; запобігає зіткненню проводів та може підвищувати вертикальний кліренс

Абревіатури систем моніторингу та технологій

Абревіатура	Розшифровка	Опис та застосування
DLR	Dynamic Line Rating	Динамічне рейтингування ліній — визначення пропускної здатності в реальному часі залежно від погодних умов; дає +30–40%
DAS	Distributed Acoustic Sensing	Розподілена акустична сенсорика — вимірювання вздовж оптоволокна; дозволяє вимірювати швидкість вітру для DLR
OPGW	Optical Ground Wire	Оптичний грозозахисний трос з вбудованим оптоволоконном; наявний на більшості ліній 110+ кВ в Україні
BOTDR	Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry	Бріллюєнівська оптична рефлектометрія; використовується для моніторингу деформацій та ожеледі через OPGW
DSTS	Distributed Strain and Temperature Sensing	Розподілена сенсорика деформацій та температури; ширший клас технологій, що включає BOTDR
BFS	Brillouin Frequency Shift	Зсув Бріллюєнівської частоти — ключовий параметр для виявлення деформацій та ожеледі
LiDAR	Light Detection and Ranging	Лазерне сканування для отримання 3D-моделі місцевості та рослинності; основа оцінки кліренсів
GIS	Geographic Information System	Геоінформаційна система; платформа для управління просторовими даними про мережу
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Система диспетчерського управління та збору даних; основа управління енергосистемою
BIM	Building Information Modelling	Інформаційне моделювання споруд; основа цифрового двійника для будівництва ПЛ

Абревіатури методів аналізу та проектування

Абревіатура	Розшифровка	Опис та застосування
MCE/FEA/FEM	Метод скінченних елементів / Finite Element Analysis	Числовий метод розрахунку конструкцій; основа структурного аналізу опор та фундаментів
CFD	Computational Fluid Dynamics	Обчислювальна гідродинаміка — моделювання потоків повітря (вітер, шквали, обтікання проводів)
AI / ШІ	Artificial Intelligence / Штучний інтелект	Широкий клас технологій для автоматизації проектування, діагностики та управління
ML	Machine Learning	Машинне навчання; навчання моделей на даних без явного програмування правил
RL	Reinforcement Learning	Навчання з підкріпленням; застосовується для оптимізації трасування ліній
GNN	Graph Neural Network	Графова нейронна мережа; ефективна для аналізу мережевих структур ПЛ
LLM	Large Language Model	Велика мовна модель (напр. GPT); застосовується для автоматичної перевірки нормативів
AAD	AI-Augmented Design	Проектування з підтримкою ШІ; чотирирівнева система оптимізації ліній ПЛ
SPT	Standard Penetration Test	Стандартне динамічне зондування ґрунту — основний метод геотехнічних досліджень для фундаментів
GSM	Ground Structure Method	Метод ґрунтової структури для топологічної оптимізації опор; дозволяє знизити масу на 10–15%

Абревіатури електроенергетики та стандартів

Абревіатура	Розшифровка	Опис та застосування
ПЛ / OHL	Повітряна лінія / Overhead Line	Лінія електропередачі на опорах; основний тип в Україні (понад 170 000 км)
ВН / EHV	Надвисока напруга / Extra High Voltage	Клас напруги 330 кВ і вище; магістральні лінії системоутворюючої мережі
TSO	Transmission System Operator	Оператор системи передачі; в Україні — НЕК «Укренерго» (220–750 кВ)
RCM	Reliability-Centred Maintenance	Технічне обслуговування на основі надійності; ризик-орієнтований підхід до планування ТО
CRI	Corrosion Risk Index	Індекс корозійного ризику; комплексний показник для пріоритизації захисту від корозії
SIL	Surge Impedance Loading	Навантаження хвильового опору; природне навантаження лінії без реактивної потужності
CAPEX	Capital Expenditure	Капітальні витрати — одноразові інвестиції у будівництво або реконструкцію
OPEX	Operational Expenditure	Операційні витрати — поточні витрати на обслуговування та управління
LCA	Life Cycle Assessment	Оцінка життєвого циклу — комплексний аналіз екологічного впливу від виробництва до утилізації
GWP	Global Warming Potential	Потенціал глобального потепління; виражається в кг CO ₂ -еквівалент

Абревіатури діагностики та неруйнівного контролю

Абревіатура	Розшифровка	Опис та застосування
НДК / NDT	Неруйнівний контроль / Non-Destructive Testing	Комплекс методів оцінки матеріалів та конструкцій без порушення їх цілісності
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity	Ультразвукова імпульсна швидкість — оцінка якості та однорідності бетону
GPR	Ground-Penetrating Radar	Георадар — виявлення армування, порожнин та дефектів у бетоні та ґрунті без розкопок
SONREB	SONic and REBound	Комбінований метод НДК: ультразвук + молоток відскоку; підвищує точність оцінки бетону
ІЧ / IR	Інфрачервоний / Infrared	Термографія — виявлення перегрітих компонентів (ізолятори, контакти, провідники)
УФ / UV	Ультрафіолетовий / Ultraviolet	УФ-камери виявляють коронні розряди на ізоляторах та арматурі
ESDD	Equivalent Salt Deposit Density	Еквівалентна щільність відкладень солі — показник рівня забруднення ізоляторів
NSDD	Non-Soluble Deposit Density	Щільність нерозчинних відкладень — доповнює ESDD для характеристики забруднення
tgδ / tan δ	Тангенс кута діелектричних втрат	Показник деградації ізоляційних матеріалів; критичний для оцінки RTV-покриттів ізоляторів
RTV SiR	Room Temperature Vulcanizing Silicone Rubber	Силіконова гума холодного вулканізування — захисне покриття ізоляторів від забруднення

Ключові терміни та визначення

Рекондукторинг

Заміна проводів на ПЛ *без демонтажу опор*; дозволяє збільшити пропускну здатність на 50–100% при мінімальних витратах. Найефективніший метод модернізації в умовах обмежених ресурсів.

Провисання (Sag)

Максимальне вертикальне відхилення провідника від прямої між точками підвісу. Зростає при нагріванні — критичний параметр для кліренсу. HTLS-провідники мінімізують провисання при тих самих умовах навантаження.

Кліренс

Мінімальна допустима відстань від проводу до землі, споруд та рослинності. Визначається нормативами (IEC 60076, ПУЕ) залежно від класу напруги. Порушення кліренсу — причина аварій і вимагає негайного усунення.

Ампасіті (Ampacity)

Максимально допустимий струм провідника за умови не перевищення температурного ліміту. DLR підвищує реальну ампасіті на 30–40%, використовуючи охолоджуючий ефект вітру.

Флешандер (Flashunder)

Пробій по поверхні розділу стрижень/оболонка композитного ізолятора — основний тип відмови після 20+ років служби. Виявляється ІЧ-інспекцією за ~1 рік до відмови.

Галопування (Galloping)

Низькочастотні (0,1–1 Гц) коливання проводів великої амплітуди під дією вітру при наявності ожеледі. небезпечне через можливе зіткнення фаз та втомне руйнування арматури.

Еолові вібрації

Високочастотні (5–150 Гц) вібрації проводів від вітру, що спричиняють втомне руйнування алюмінієвих жил у місцях затиснення. Компенсуються амортизаторами Стокбріджа.

Шквал / Downburst

Локальний низхідний потік повітря, що розповсюджується радіально від точки удару. Шквальний вітер небезпечніший за рівний вітер тієї ж швидкості через динамічний імпульс. Може порушити кліренси до структурної відмови опори.

Цифровий двійник

Цифрова копія фізичного об'єкта з реальними даними моніторингу для моделювання, прогнозування стану та підтримки управлінських рішень протягом усього терміну служби.

Точка коліна (Knee-Point)

Температура провідника ACSR (~80–100°C), вище якої всі механічні навантаження переходять на сталеве осердя (алюміній не несе навантаження). Критична для розрахунку провисання HTLS-провідників.

Джерела

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ CIGRE B2 2026

- [B2 PS1 11762 TOTH 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 10118 DEPAMELAERE 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 10135 DEPPA 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 12490 BUTSCHEN 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 11017 BRAGA 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 10324 WILLIAMS 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 11788 ROH 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 11313 NEGARPOUR 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 10286 LOMMERS 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 12232 KOCABAYRAKTAR 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 10371 SHEOKAND 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 12503 ZHANG 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 11904 NEGI 2026.pdf](#)
- [B2 PS2 10831 TERUI 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 12276 STRUMBELJ 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 11552 GUTMAN 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 10379 SRIVASTAVA 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 12606 LUDERE 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 10361 PAUL 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 11754 OGUZ 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 10291 BÜRGER 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 12599 SOUZA 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 12186 BEDOYA 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 12246 BUGMANN 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 11363 HASSINEN 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 12504 QIU 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 11901 IBRAHIM 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 12338 PUFFER 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 10290 TANNEMAAT 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 12229 TOTH 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 10383 PAUL 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 10704 GIUDICELLI 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 11019 MORENO 2026 .pdf](#)
- [B2 PS2 10711 SAID 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 11757 EDWARDS 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 10773 JACOBS 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 11873 NYGAARD 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 12364 TODOROVIC 2026 .pdf](#)
- [B2 PS3 11630 ZNAIDI 2026 .pdf](#)
- [B2 PS1 10727 KHAN 2026 .pdf](#)