

VII KONFERENCJA

LINIE I STACJE ELEKTROENERGETYCZNE

21-22 PAŹDZIERNIKA 2026 r.

PTPiREE

Monitoring online kabli SN z wykorzystaniem reflektometrii TDR

Instytut Energetyki
ODDZIAŁ GDAŃSK

mgr inż. Przemysław Dopierała
mgr inż. Łukasz Kajda
dr inż. Tomasz Samotyjak

Wisła, 22 października 2026 r.

Dlaczego monitoring jest potrzebny?

Zwykle stanem kabla interesujemy się dopiero wtedy, gdy pojawia się realny problem w sieci.

1 Ciągłość zasilania

Uszkodzenie kabla SN oznacza przerwy w zasilaniu, koszty i presję czasu

2 Lokalizacja

W przypadku uszkodzenia kabla przydatne jest wskazanie miejsca uszkodzenia

3 Ograniczenia innych metod

Wiele metod daje dobry wynik, ale wymaga postoju lub osobnej diagnostyki

4 Wskazania CIGRE*

Dokumenty CIGRE potwierdzają rosnącą rolę monitoringu online i pomiarów TDR w diagnostyce kabli

W praktyce - chcemy wcześnie wykryć zmianę i ułatwić późniejszą lokalizację uszkodzenia

* *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*
Międzynarodowa Rada ds. Dużych Sieci Elektrycznych

Co mówią dokumenty CIGRE



Monitoring online

TB 825

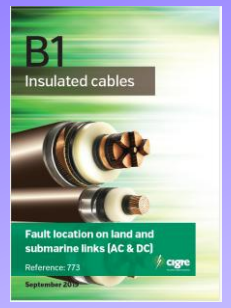
Pokazuje rosnące zainteresowanie monitoringiem online oraz wskazuje TDR i DTS jako narzędzia wspierające dostępność systemów kablowych



Fingerprint* i diagnostyka

TB 924

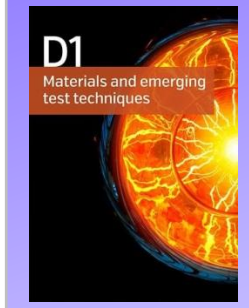
Traktuje TDR jako podstawową metodę diagnostyczną oraz zaleca wykonanie fingerprintu po uruchomieniu i okresowe powtarzanie pomiarów



Lokalizacja uszkodzeń

TB 773

Wymienia TDR i FDR wśród podstawowych narzędzi stosowanych w praktyce do lokalizacji uszkodzeń



Wspólne dane i metodyka

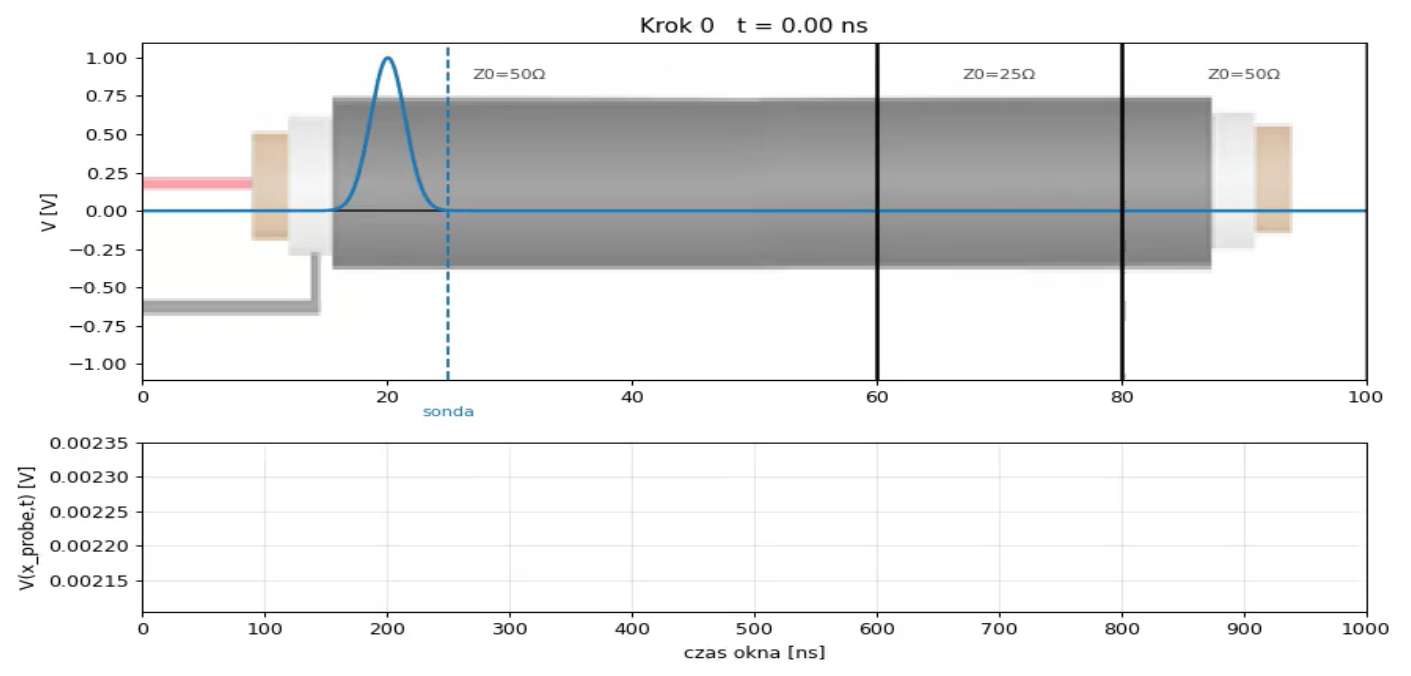
WG D1.81

Prace nad ujednoliceniem formatu danych TDR i sposobu porównywania reflektogramów** w różnych warunkach

Wspólny kierunek wskazywany w dokumentach CIGRE to: wykonanie fingerprintu, kolejne pomiary okresowe lub monitoring online oraz porównywanie wyników w diagnostyce i lokalizacji uszkodzeń

* *Fingerprint* – pomiar referencyjny
** *Reflektogram* – rejestracja odbitego impulsu

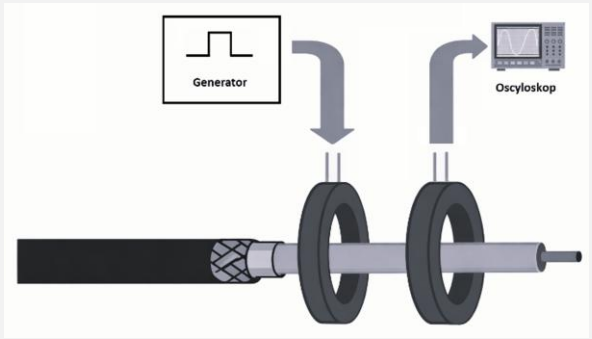
Podstawy działania reflektometrii TDR*



- Do badanego kabla wprowadzany jest krótki impuls pomiarowy
- Każda zmiana impedancji falowej powoduje powstanie odbicia części sygnału
- Czas powrotu odbicia pozwala wyznaczyć położenie miejsca zmiany.
- Amplituda i kształt odbicia pomagają ocenić charakter nieciągłości

* *TDR – Time Domain Reflectometry* – Reflektometria w dziedzinie czasu

Koncepcja



1 Fingerprint

Referencyjny pomiar poprawnego stanu kabla

2 Aktualny pomiar

Rejestracja aktualnego reflektogramu

3 Wyrównanie i normalizacja

Dopasowanie czasu i amplitudy

4 Detekcja zmian

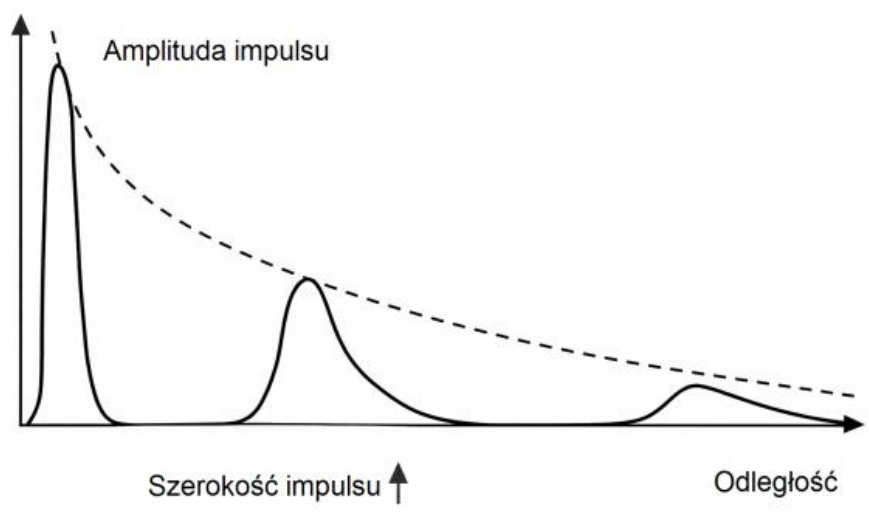
Ocena odchylenia i decyzja diagnostyczna

W oparciu o dokumenty CIGRE opracowano spójną koncepcję monitoringu online opartego na TDR

- pomiar bez wyłączania kabla z eksploatacji (praca online)
- bezinwazyjne wprowadzenie impulsu testowego przez sprzęg indukcyjny
- rejestracja odpowiedzi kabla z użyciem czujnika HFCT*
- porównanie bieżącego reflektogramu z pomiarem referencyjnym (fingerprintem)
- Integracja z telemechaniką SN

** HFCT – High Frequency Current Transformer*
Przekładnik prądowy wysokich częstotliwości

Ograniczenia i trudności pomiarów TDR

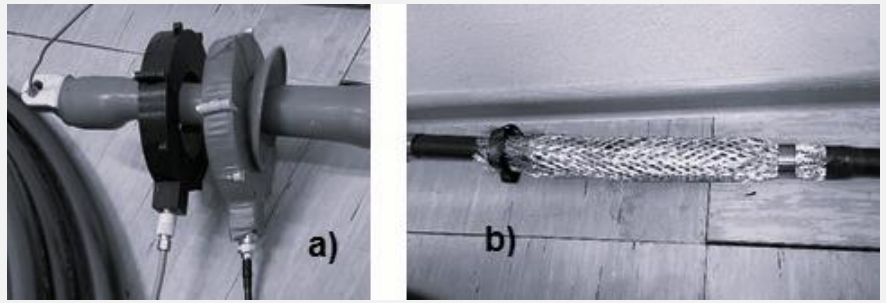


Skuteczność TDR w warunkach obiektowych zależy od parametrów impulsu, toru pomiarowego i powtarzalności akwizycji

- **Rozdzielczość a zasięg** - lepsza rozdzielczość wymaga krótszego impulsu, ale skraca użyteczny zasięg pomiaru.
- **Tłumienie i dyspersja** – wraz z długością kabla impuls ulega osłabieniu i poszerzeniu, co zmniejsza amplitudę odbić oraz utrudnia identyfikację odległych zmian.
- **Niedopasowanie toru pomiarowego** - sprzęgi i czujniki wprowadzają własne zniekształcenia.
- **Powtarzalność** - wiarygodna analiza wymaga stałej konfiguracji toru i porównywalnych warunków pomiaru.

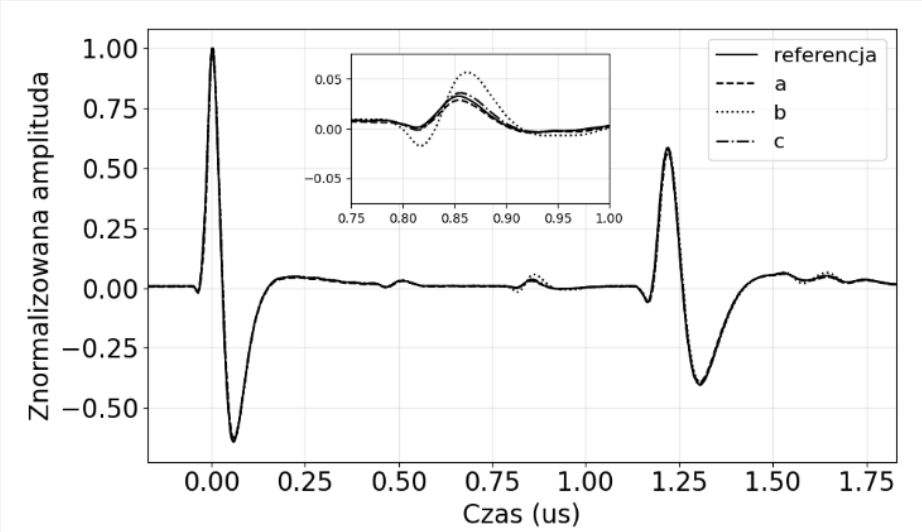
Prototyp i weryfikacja laboratoryjna

Obiekt badań



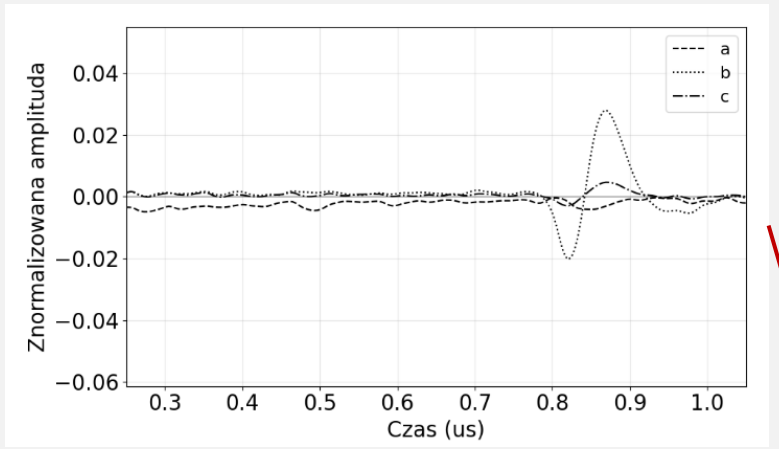
- 100 m kabla SN typu NA2XS(FL)2Y
- Dwie mufy, w tym jedna celowo zmodyfikowana
- Przypadki testowe odpowiadające 20%, 40% i 80% degradacji oplotu
- Dla każdego przypadku zrejestrowano 64 reflektogramy

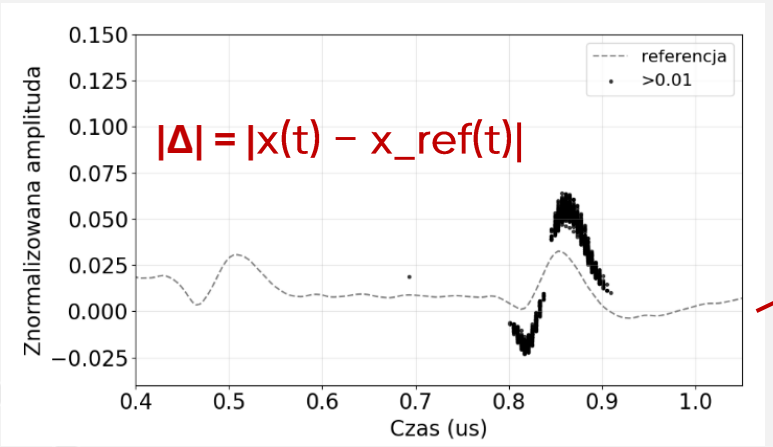
Wynik TDR



W obszarze modyfikowanej mufy obserwuje się różnice między przebiegiem referencyjnym a przypadkami testowymi.

Analiza odchyleń względem fingerprintu



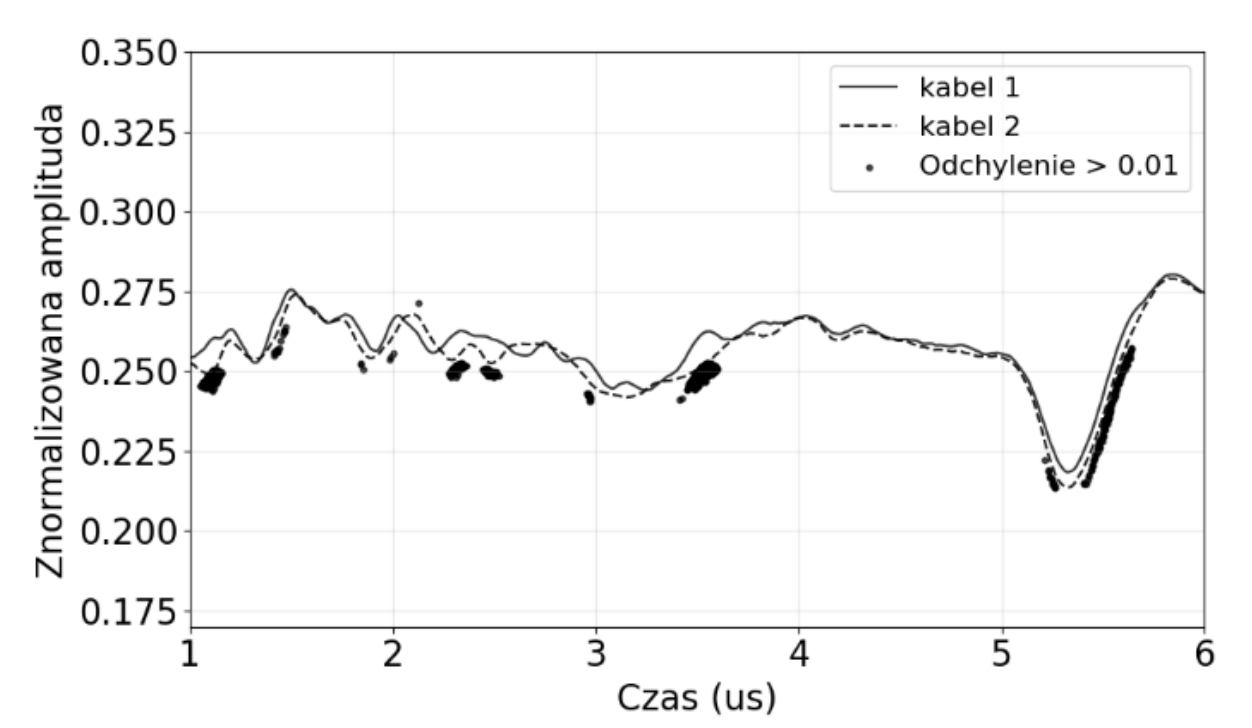


1. **Fingerprint**
2. **Aktualny pomiar**
3. **Wyrównanie i normalizacja**
4. **Detekcja zmian**

1. Wyznaczenie fingerprintu
2. Pomiaru on-line
3. Normalizacja: od aktualnego przebiegu odejmujemy przebieg referencyjny
4. Ustaloną wartość |Δ| przyjmujemy jako próg wystąpienia anomalii

Pojedyncze przekroczenie może wynikać z zakłócenia, ale powtarzalne odchylenia w tym samym obszarze wskazują na zmianę stanu kabla

Znaczenie pomiaru referencyjnego



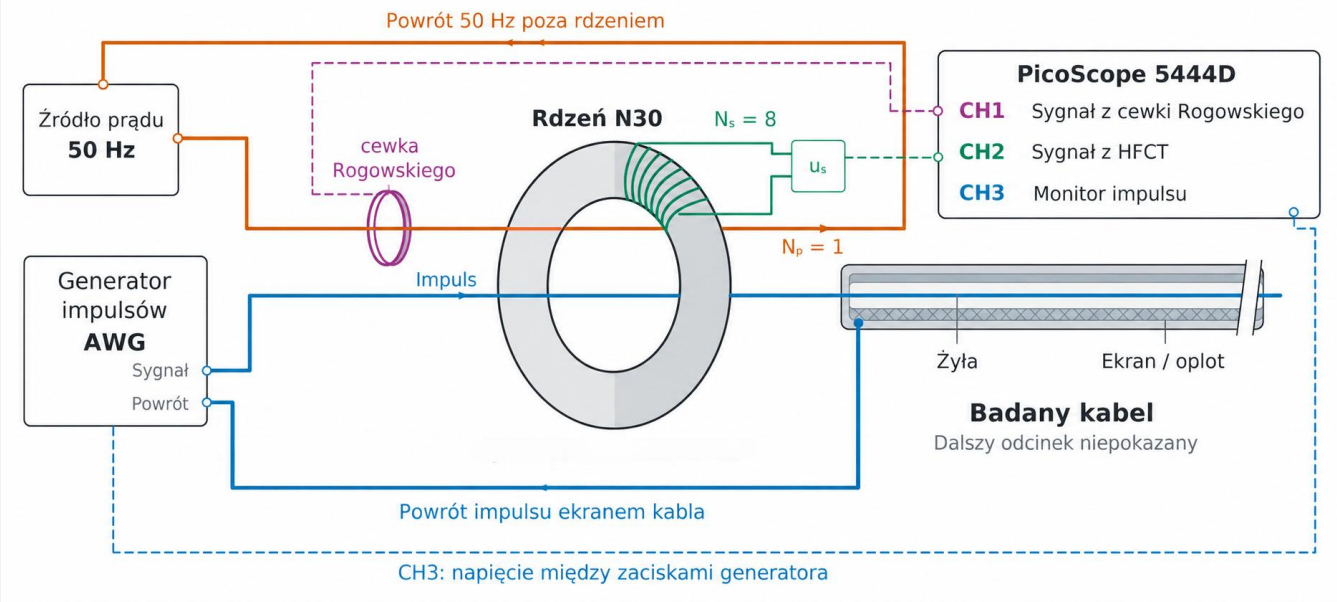
Nawet sąsiednie odcinki kabla mogą dawać różne przebiegi TDR.

- Badano dwa odcinki kablowe o długości 600 m
- Między reflektogramami można zaobserwować drobne różnice
- Pomiar referencyjny powinien być wyznaczany dla badanego odcinka kabla, tego samego sprzęgu i tej samej konfiguracji pomiarowej.

Fingerprint musi być wyznaczany lokalnie: dla tego samego kabla i tej samej konfiguracji pomiarowej. Monitoring online ułatwia spełnienie tego warunku

Wpływ prądu roboczego- badania

Kabel SN typu NA2XS(FL)2Y, dł. 100 m, przekrój żyły 70 mm^2



N30 – oznaczenie fabryczne materiału rdzenia
N_p, N_s – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego

Przekładnik HFCT:

- na żyle kabla
- na dodatkowym przewodzie z prądem roboczym 50 Hz (wymuszenie oddziaływania prądu na rdzeń).

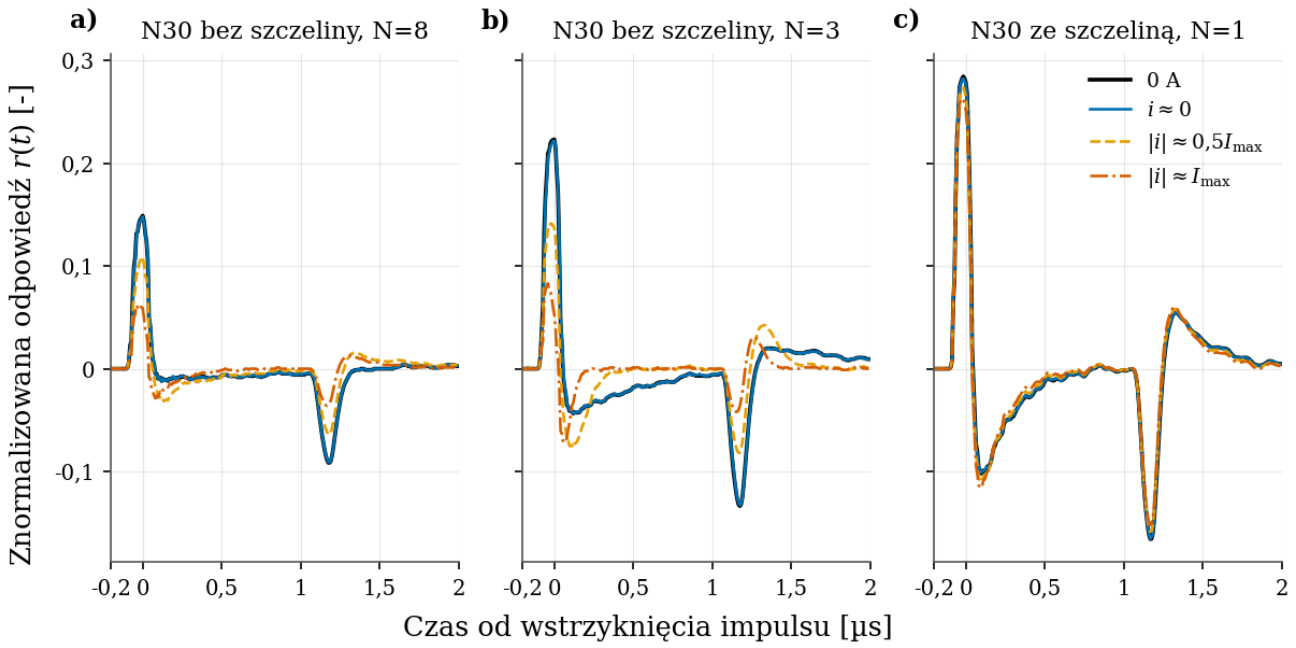
Sygnał wejściowy: Napięcie 0..2 V, szerokość impulsu 100 ns, częstotliwość impulsów: 50 kHz,

Rejestracja – oscyloskopowa 125 MS/s.

- CH1 – sygnał porównawczy z cewki Rogowskiego
- CH2 – reflektogram
- CH3 – impuls wejściowy (wymuszenie, synchronizacja, normalizacja).

** HFCT – High Frequency Current Transformer*
Przekładnik prądowy wysokich częstotliwości

Wpływ prądu roboczego – wyniki



Rdzeń nasyca się od prądu roboczego 50 Hz

Obserwacje:

- Dla kabla dł. 100 m czas odpowiedzi to 2 ms

  => Dla kabla dł. 10 km czas to 0,2 ms
- Okres np. 10 harmonicznej to 2 ms

Niewielkie poziomy w wyższych harmonicznych zakłócają (tłumią) sygnały odbite!

Wymagany jest rdzeń ze szczeliną
i wszystkimi tego konsekwencjami

- I_{max} = ok 60 A – prąd roboczy 50 Hz
- N – liczba zwojów uzwojenia wtórnego obwodu pomiarowego
- Przebieg referencyjny (0 A, czarny, rejestrowany bez prądu roboczego 50 Hz) jest pokrywa się z przebiegiem impulsu wstrzykiwanego przy przejściu sygnału roboczego przez zero (i ≈ 0, niebieski)

Wyzwania

2027:

- Sprzęg możliwy do zainstalowania w polu (rozmiar, materiał rdzenia, sposób montażu,...)
- System wstrzykiwania i detekcji impulsów dedykowany do stacji / złącza kablowego SN
- Badania pilotażowe na różnych typach kabli
- Odporność na zakłócenia

Ponadto:

- Integracja z układem telemechaniki – opcja
- Obszar WN

Wykrycie uszkodzenia w chwili gdy ono wystąpi, to za mało

- predykacja uszkodzenia
- wskazanie miejsca uszkodzenia

Wnioski

- Monitoring online TDR dostarcza użytecznych informacji diagnostycznych w warunkach normalnej pracy kabla
- Podstawą wiarygodnej oceny jest lokalny fingerprint wyznaczony dla tego samego kabla i tej samej konfiguracji pomiarowej
- Największą wartość daje analiza zmian w czasie powtarzalnych odchyleń, a nie pojedynczego reflektogramu
- Monitoring online ułatwia spełnienie warunku porównywalności pomiarów i ułatwia późniejszą efektywną lokalizację uszkodzeń
- Zaproponowane rozwiązanie działa i jest perspektywiczne
- Wymaga szerokiego spektrum badań, doboru elementów, metod wstrzykiwania sygnału, opracowania komponentów możliwych do montażu w celce SN

Przeznaczenie

Sieć WN

dystrybucja

farmy wiatrowe

farmy PV

Sieć SN

główne ciągi
tereny przemysłowe

obiekty istotne

służba zdrowia
telekomunikacja, zaopatrzenie
w media, pompownie

generacje PV

Sieć SN/nn

miejska

wiejska

Instytut Energetyki
ODDZIAŁ GDAŃSK

Dziękujemy za uwagę

mgr inż. Przemysław Dopierała p.dopierala@ien.gda.pl
mgr inż. Łukasz Kajda l.kajda@ien.gda.pl
dr inż. Tomasz Samotyjak t.samotyjak@ien.gda.pl