

Lokalizacja i rozpoznawanie defektów WNZ w kablach elektroenergetycznych o izolacji wytłaczanej

KABEL
2024

XXIX KONFERENCJA SZKOLENIOWO-TECHNICZNA
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI KABLOWE I NAPOWIETRZNE

12-15 marca 2024

Lidzbark Warmiński

Hotel Krasicki****

Tomasz BEDNARCZYK¹⁾, Udo RANNINGER²⁾, Wojciech KOŁTUNOWICZ²⁾, Piotr GRABOWSKI³⁾, Maciej ŁUSZCZ⁴⁾

¹⁾OMICRON Energy Solutions Polska, ²⁾OMICRON electronics GmbH, ³⁾Fabryka Kabli ELPAR, ⁴⁾CCS Energy



Lokalizacja i rozpoznawanie defektów WNZ w kablach elektroenergetycznych o izolacji wytłaczanej

Tomasz Bednarczyk, Udo Ranninger, Wojciech Kołtunowicz – OMICRON

Piotr Grabowski, **Elpar** FABRYKA KABLI Maciej Łuszcz **CCS** Cable Complex Solutions

▶ Normy prób napięciowych kabli o izolacji wytłaczanej 1÷30 kV

▶ IEC 60885-3 : 2015

- ▶ Test methods for partial discharge measurement on lengths of extruded power cables – Superposition of Waves
 - ▶ PD measurement shall be carried out using the test techniques specified in IEC 60270

▶ IEC 60270 : 2015

- ▶ HV test techniques – PD measurement

▶ IEC 60502 : 2014

- ▶ Power cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)



IEC 60885-3

Edition 2.0 2015-04

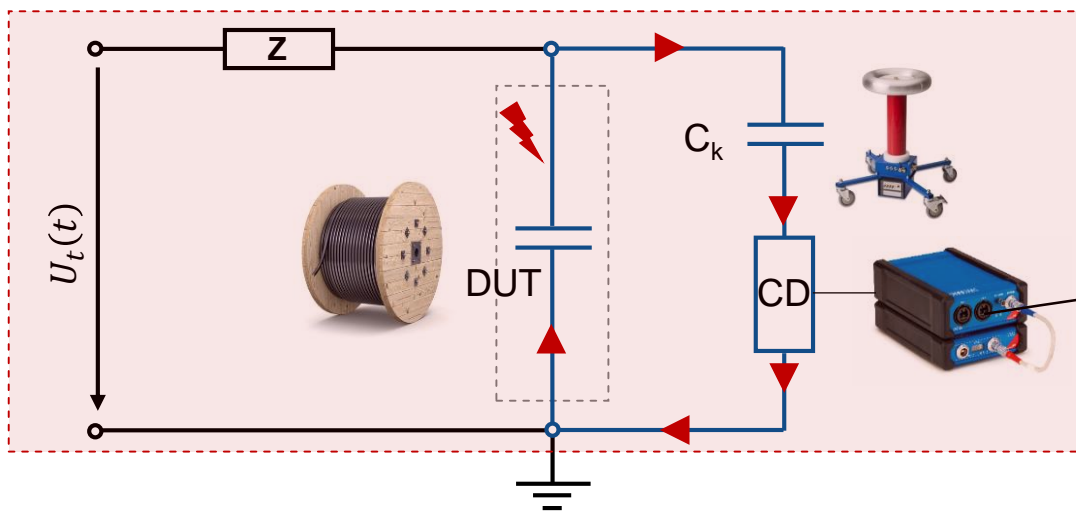
**INTERNATIONAL
STANDARD**

**NORME
INTERNATIONALE**

Electrical test methods for electric cables –
Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded
power cables

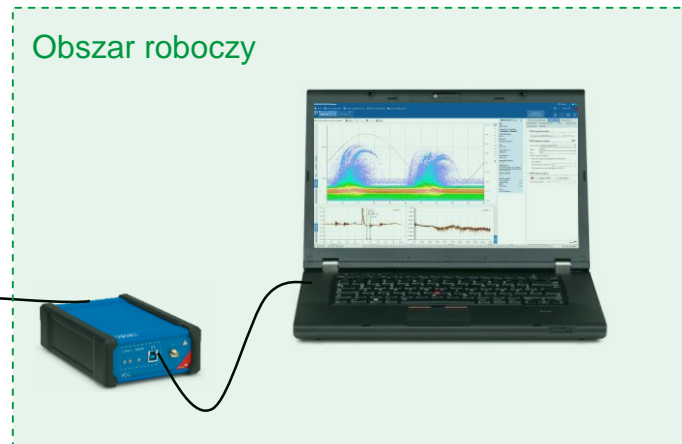
Méthodes d'essais électriques pour les câbles électriques –
Partie 3: Méthodes d'essais pour la mesure des décharges partielles sur des
longueurs de câbles de puissance extrudés

Standardowa konfiguracja pomiaru WNZ

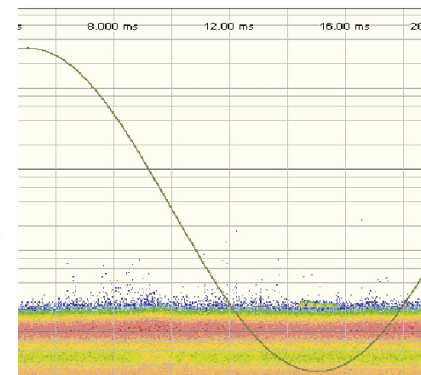
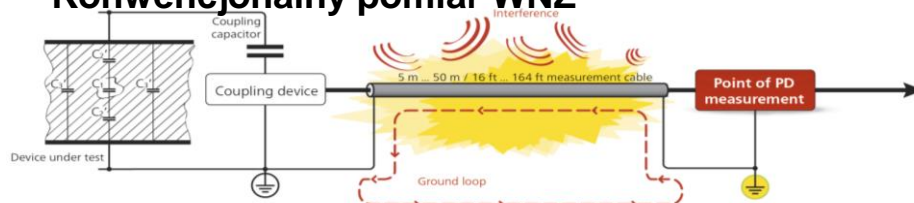


Światłowód

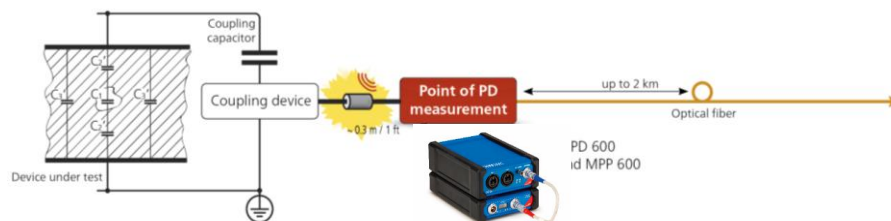
Obszar roboczy



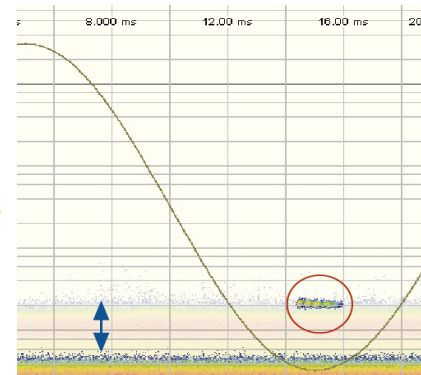
Konwencjonalny pomiar WNZ



Sygnal WNZ w pasmie zakłóceń

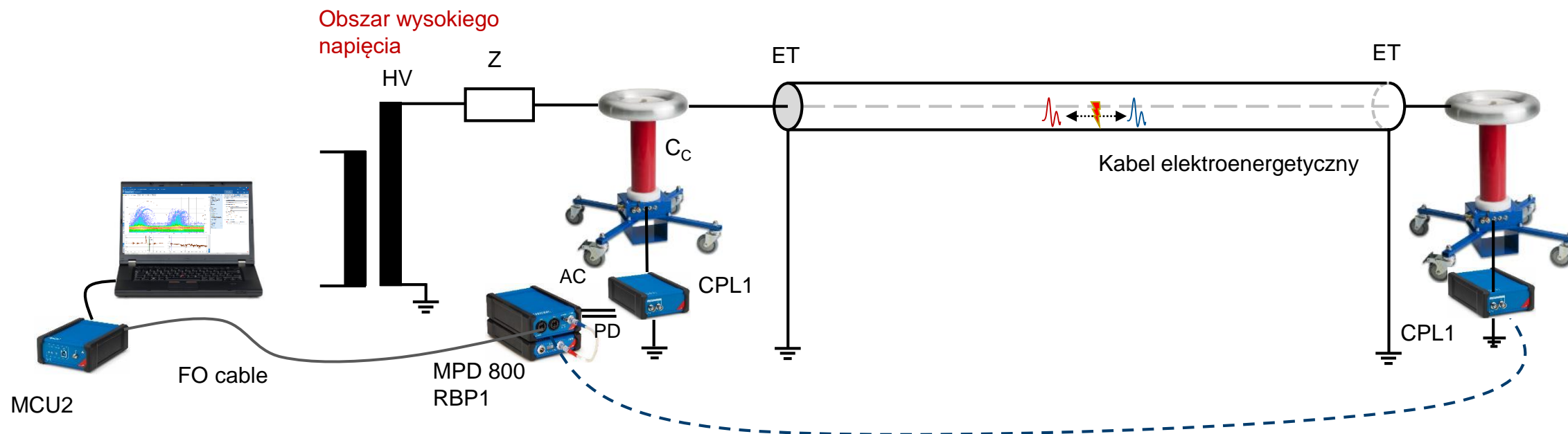


MPD 800 i RBP1



Sygnal WNZ przy zredukowanym poziomie zakłóceń (połączenie światłowodowe)

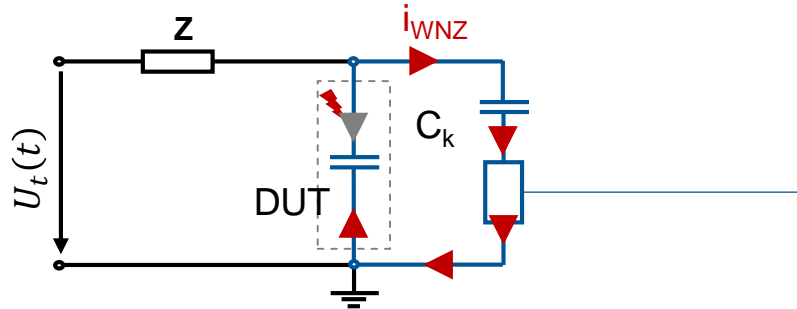
Możliwości pomiaru WNZ



Synchroniczny pomiar na dwóch końcach kabla.

► Sposób pomiaru i wyświetlania WNZ

- (1) Prąd WNZ i_{WNZ} jest mierzony jako strata napięcia na impedancji sprzęgającej:

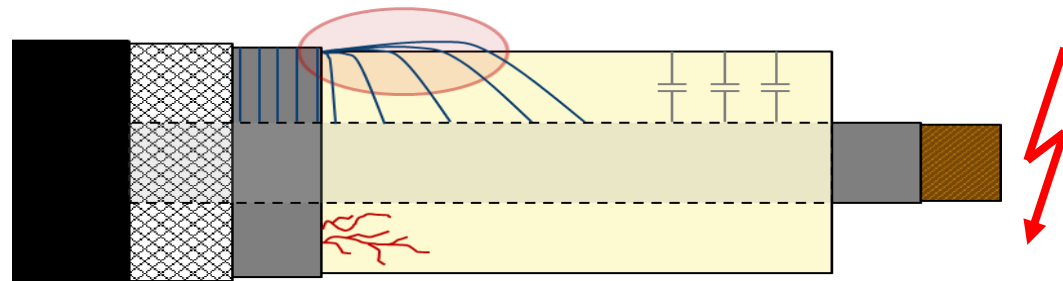
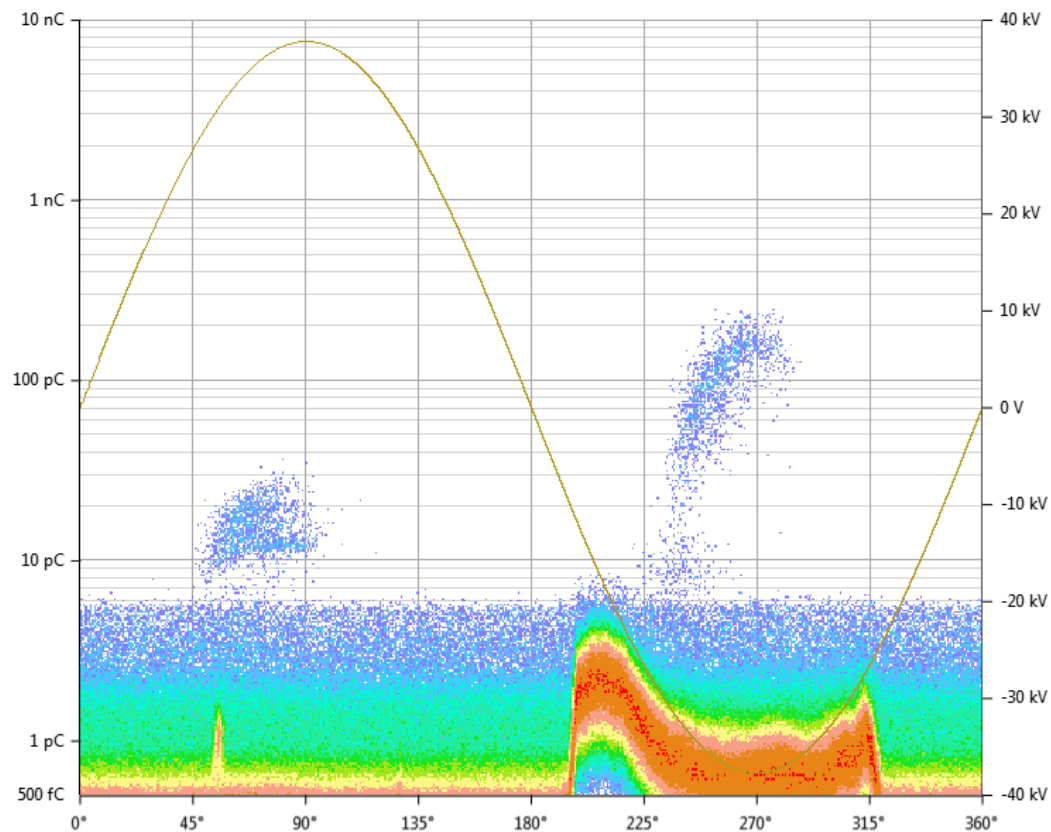


- (2) Mierzony sygnał w dziedzinie czasu (oscyloskop) jest konwertowany do dziedziny dziedzin częstotliwości przedstawiając nieodfiltrowany sygnał z informacjami o częstotliwości do 35 MHz
- (3) Integracja wartości quasi-szczytowej przy użyciu cyfrowych filtrów pasmowprzepustowych ogranicza informacje do wartości:
 - ładunku Q ,
 - przebieg sinusoidalny napięcia probierczego, które „tworzą” wzorce obrazów WNZ (PRPD ang. *Phase Resolved Partial Discharge*)



Rozpoznawanie defektów w izolacji – wzorzec WNZ (PRPD)

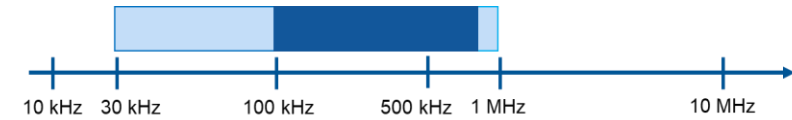
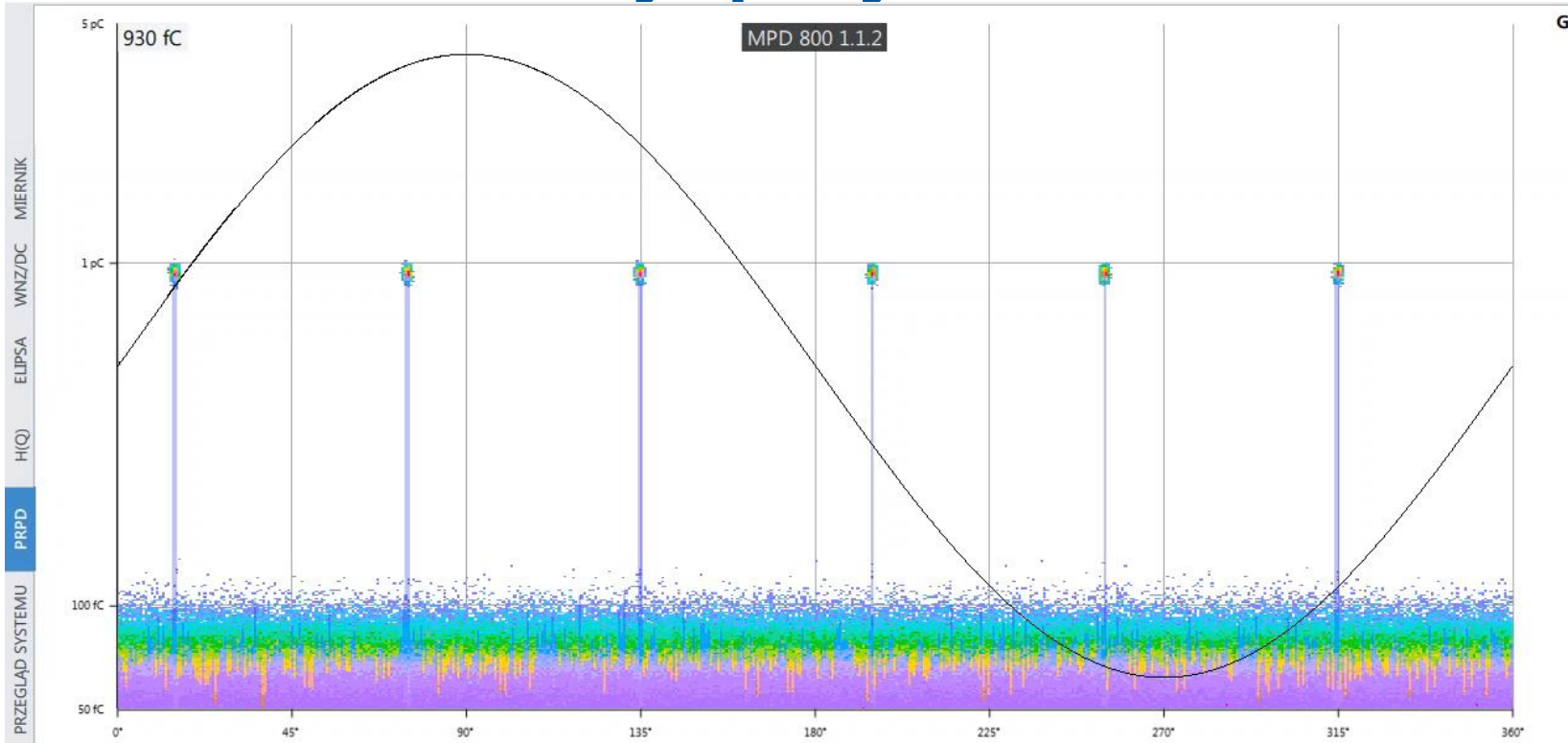
- Wzorzec WNZ (PRPD) to wizualna reprezentacja aktywności wyładowań niezupełnych (WNZ) w odniesieniu do 360° cyklu przyłożonego napięcia probierczego (sinusoidalnie zmiennego).



Kalibracji ładunku pozornego

SNR & prędkość propagacji sygnału

Poszukiwanie najlepszych ustawień -> SNR



Kalibracja i ustawienia dla MPD 800 1.1.2

ŁADUNEK RIV WNZ w mV NAPIĘCIE PRÓBY

▼ Ustawienia pomiarowe WNZ

f_m 250 kHz

Szerokość pasma 300 kHz

Ustawion 20 MHz

Ust 10 MHz

Ust 5 MHz

► Ustawien 2 MHz

► Integracji 1 MHz

► Ręczne u 600 kHz

► Automat 400 kHz

300 kHz

▼ Kalibracja 200 kHz

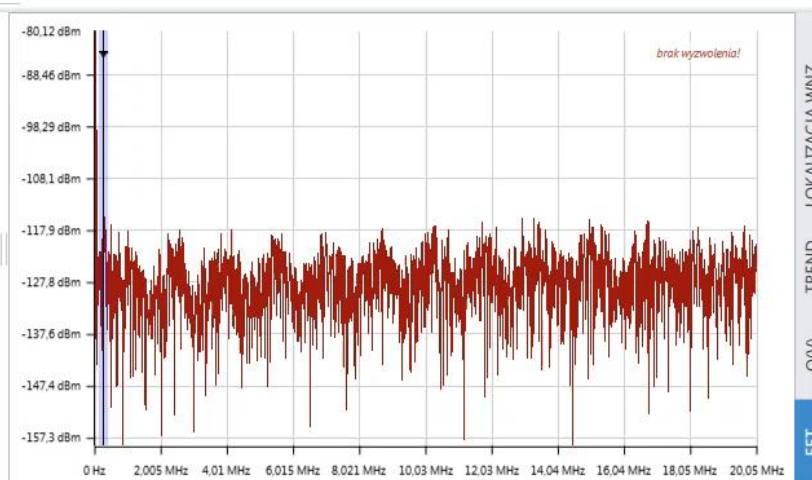
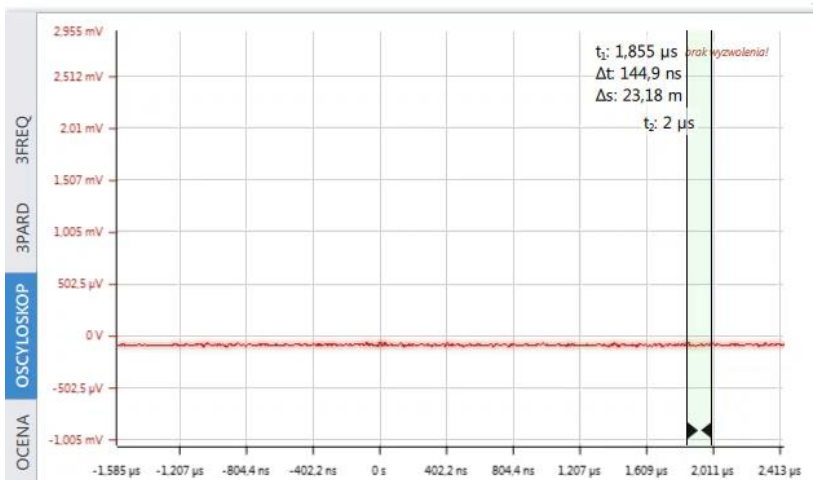
100 kHz

Ładunek d 30 kHz

Wskaźnik V 9 kHz

WTD-odpo

WNZ 4,5 kHz



▼ Ustawienia wykresu FFT

Skala pozioma 379,5 kHz/dz

Przesunięcie poziome 0 Hz

Włączone automatyczne skalowanie FFT (oś dBm)

Skala pionowa 9,829 dBm/dz

Przesunięcie pionowe -119,4 dBm

Wyświetlane wskaźniki wyzwolenia

Przechwytyj FFT Wyczyść przechwycone FFT

Próba napięciowa podstawowe informacje

Procedura pomiarowa – próba napięciowa

1	Kalibracja ładunku pozornego Q	2	Próba napięciowa + pomiar WNZ
---	--------------------------------	---	-------------------------------

Rodzaj próby	Test Procedure				Pass/Fail
Typu	<ul style="list-style-type: none"> Zgodnie z IEC 60885-3 Czułość pomiarowa <5 pC Napięcie probiercze $2 \times U_0$ przez 10 s następnie $1,73 \times U_0$ 				<ul style="list-style-type: none"> >5 pC
Rutynowe	<ul style="list-style-type: none"> Zgodnie z normą 60885-3 Czułość pomiarowa <10 pC Napięcie probiercze $2 \times U_0$ przez 10 s następnie $1,73 \times U_0$ 				<ul style="list-style-type: none"> >10 pC
Odbiorcze na miejscu zainstalowania	Rezonansowy	$\sqrt{3} \times U_0$	20-300 Hz	15 min	<ul style="list-style-type: none"> > poziom tła
	Online	$1 \times U_0$	50 / 60 Hz	24 h	
	VLF	$3 \times U_0$	0,1 Hz	15 min	
	<ul style="list-style-type: none"> Obserwacja zmian WNZ Obniżone napięcie dla starszych kabli 				

Rozpoznawanie & interpretacja WNZ

Procedura pomiarowa – rozpoznanie

1

Kalibracja ładunku pozornego Q

2

Próba napięciowa + pomiar WNZ

3

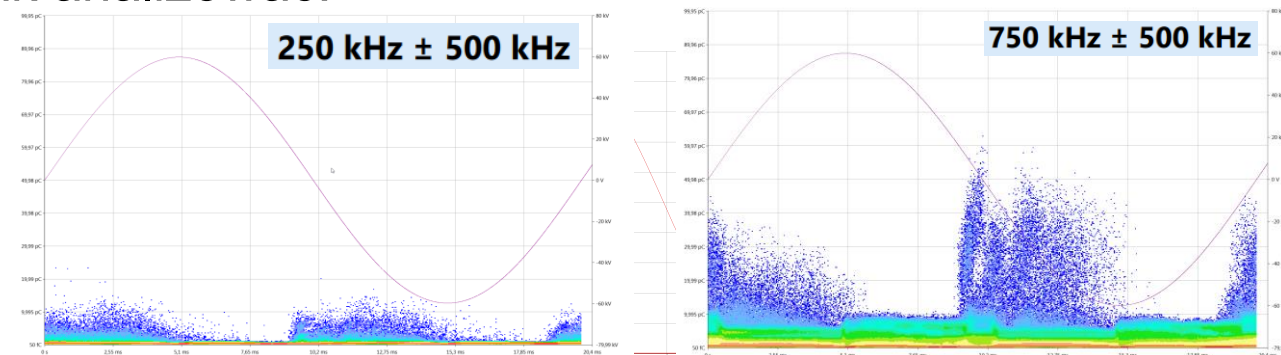
Interpretacja wyników PRPD

▶ Rodzaje wyładowań niezupełnych:

- ▶ WNZ wewnątrz linii kablowej (wszelkie wyładowania niezupełne w izolacji kabla lub jego akcesoriów)
- ▶ WNZ na zewnątrz (hałas/zakłócenia, zewnętrzne wyładowania powierzchniowe na głowicach kablowych)

▶ Co należy wziąć pod uwagę i jak analizować:

- ▶ Historia testowanego obiektu,
- ▶ Ustawienia filtrów pomiarowych
- ▶ Rodzaj wykresu PRPD
 - ▶ liniowy, logarytmiczny
 - ▶ jedno- lub dwu-biegunowy



▶ Poziom tła

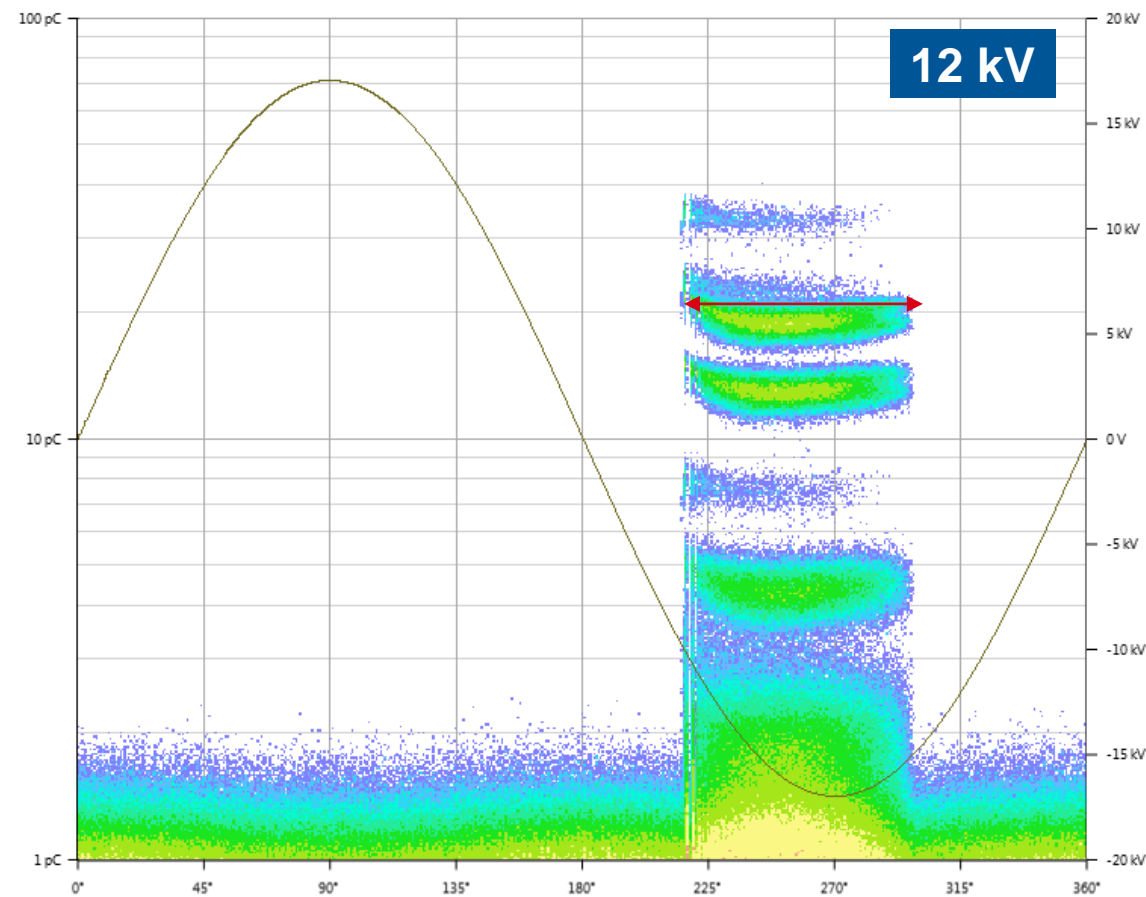
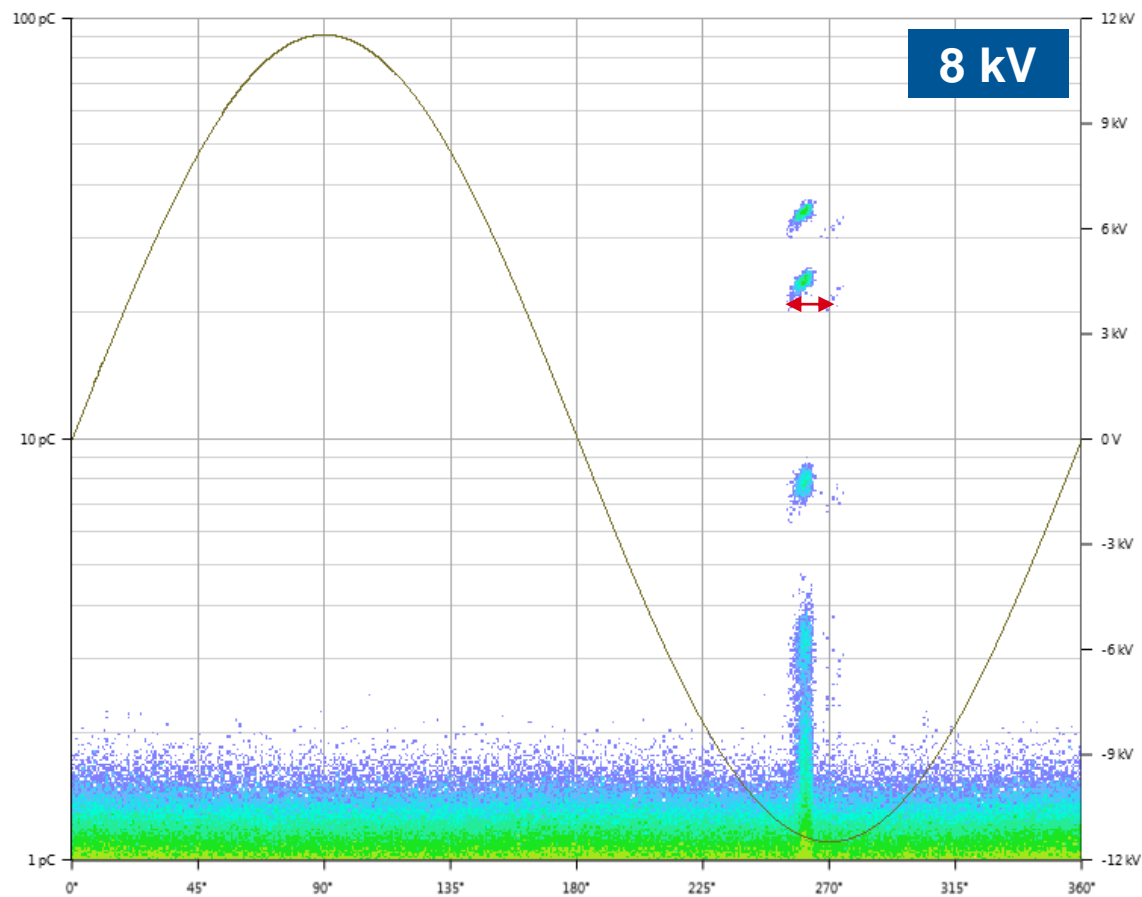
- ▶ Wartość ładunku wyładowania niezupełnego/szumu (Q_{iec}, Q_{max}, ...)
- ▶ Korelacja fazy i symetria
- ▶ Jak zmienia się wzór wyładowania / amplituda w zależności od napięcia testowego / lub w czasie
- ▶ Napięcie zapłonu / gaśnięcia WNZ
- ▶ Porównanie ze znanym wzorcem PRPD
- ▶ Weryfikacja za pomocą dodatkowych narzędzi, np. kamery akustycznej

Przykłady PRPD

Przykład obrazów PRPD: wyładowanie ulotowe

Kabel SN XLPE wyładowanie ulotowe na głowicy kablowej

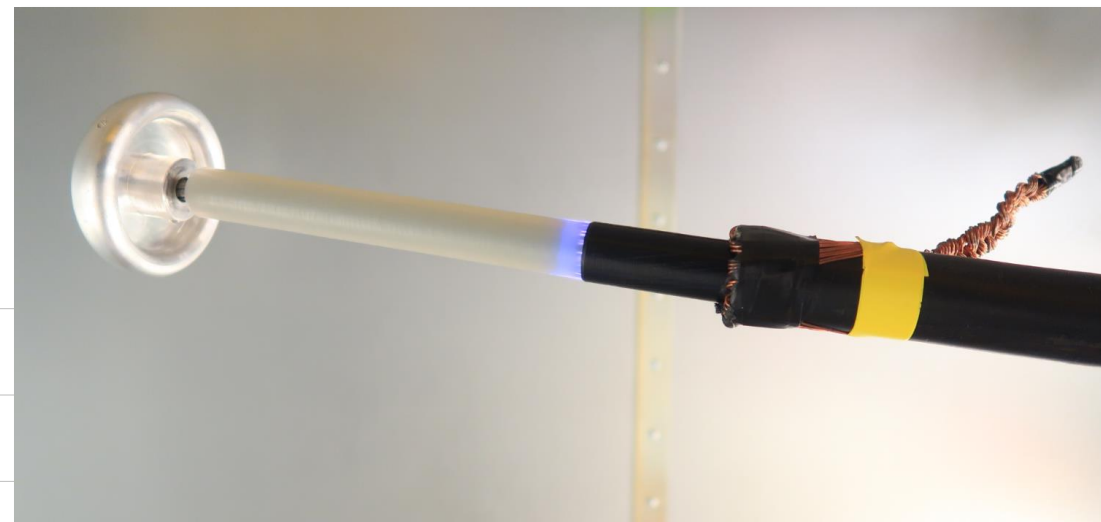
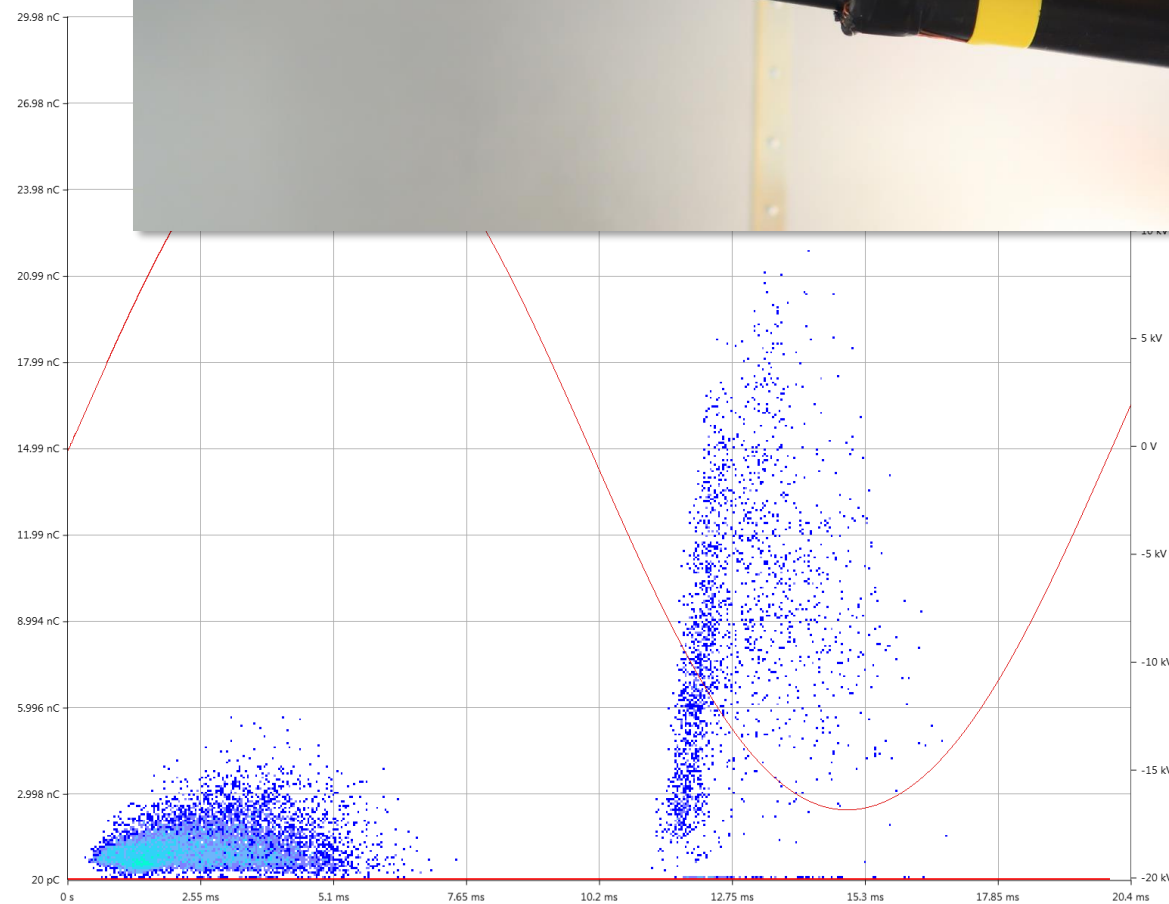
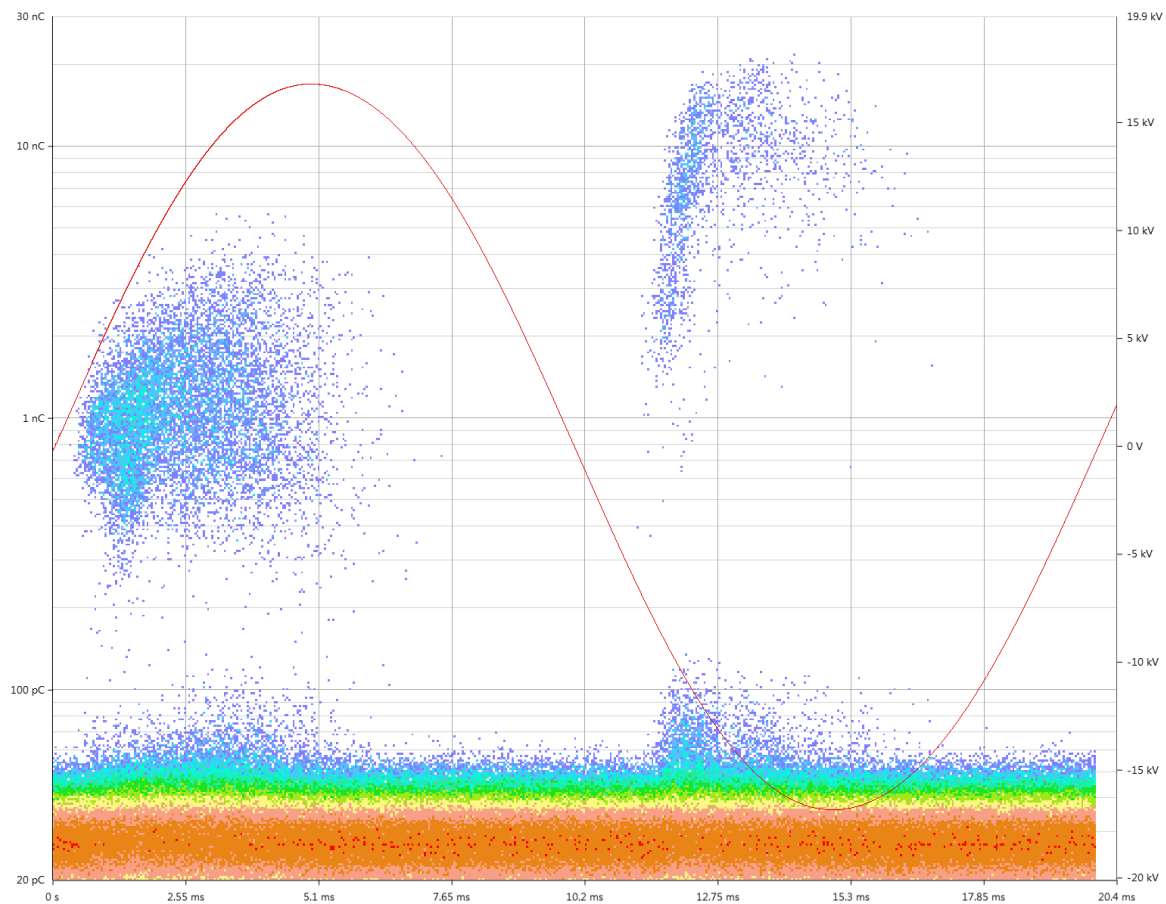
- ▶ Skala logarytmiczna, jednobiegunowa



Przykład obrazów WNZ (PRPD): powieszchniowe

Kabel SN XLPE bez głowicy kablowej

- Skala logarytmiczna / liniowa, jednobiegunowa





Lokalizacja źródła / źródeł WNZ

Procedura pomiarowa - LOKALIZACJA

1

Kalibracja ładunku
pozornego Q

2

Próba napięciowa +
pomiar WNZ

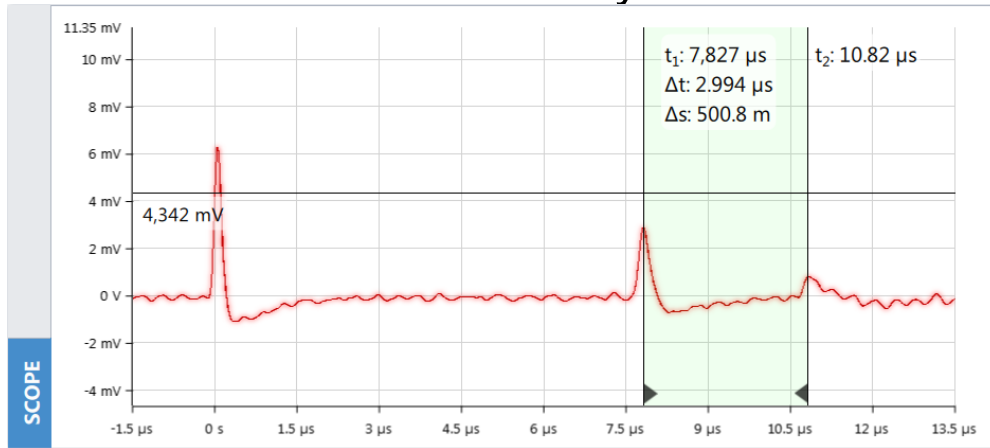
3

Interpretacja
wyników

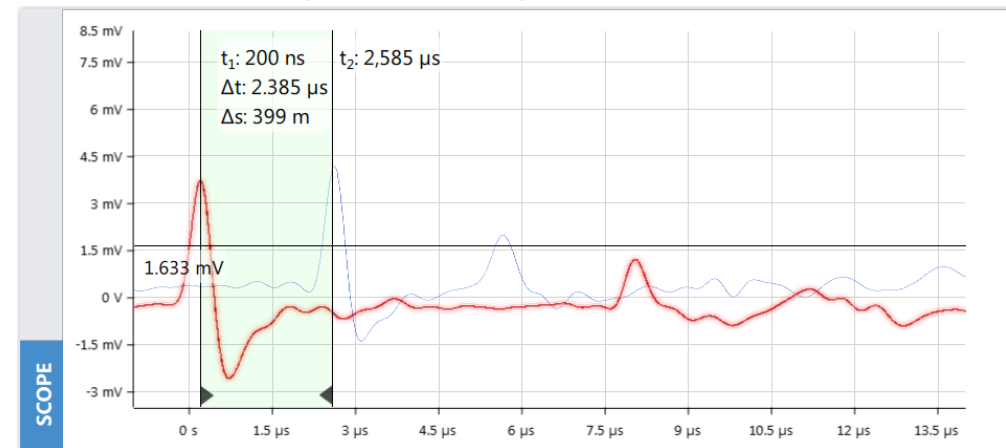
4

Lokalizacja miejsca
uszkodzenia

Time domain reflectometry - TDR



Time of flight - using 2 channels - ToF

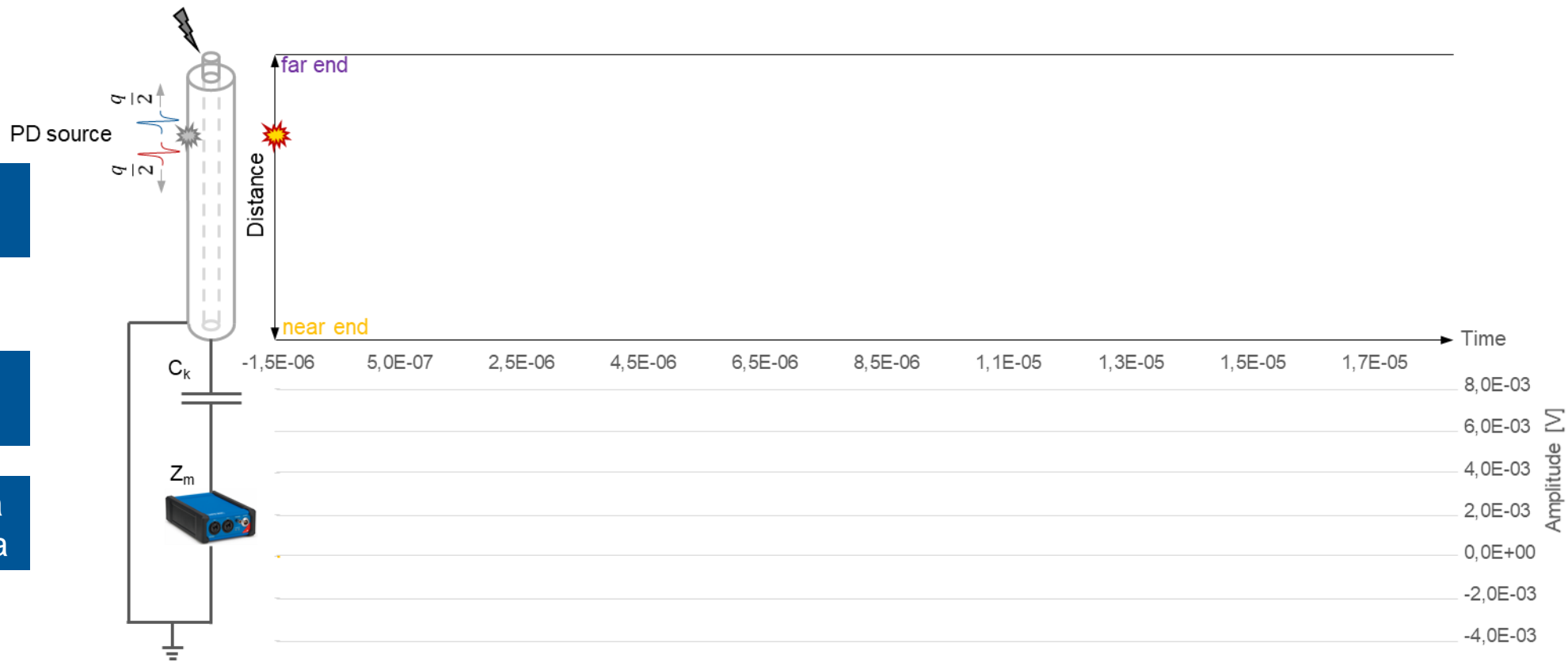


► Propagacja impulsu – TDR

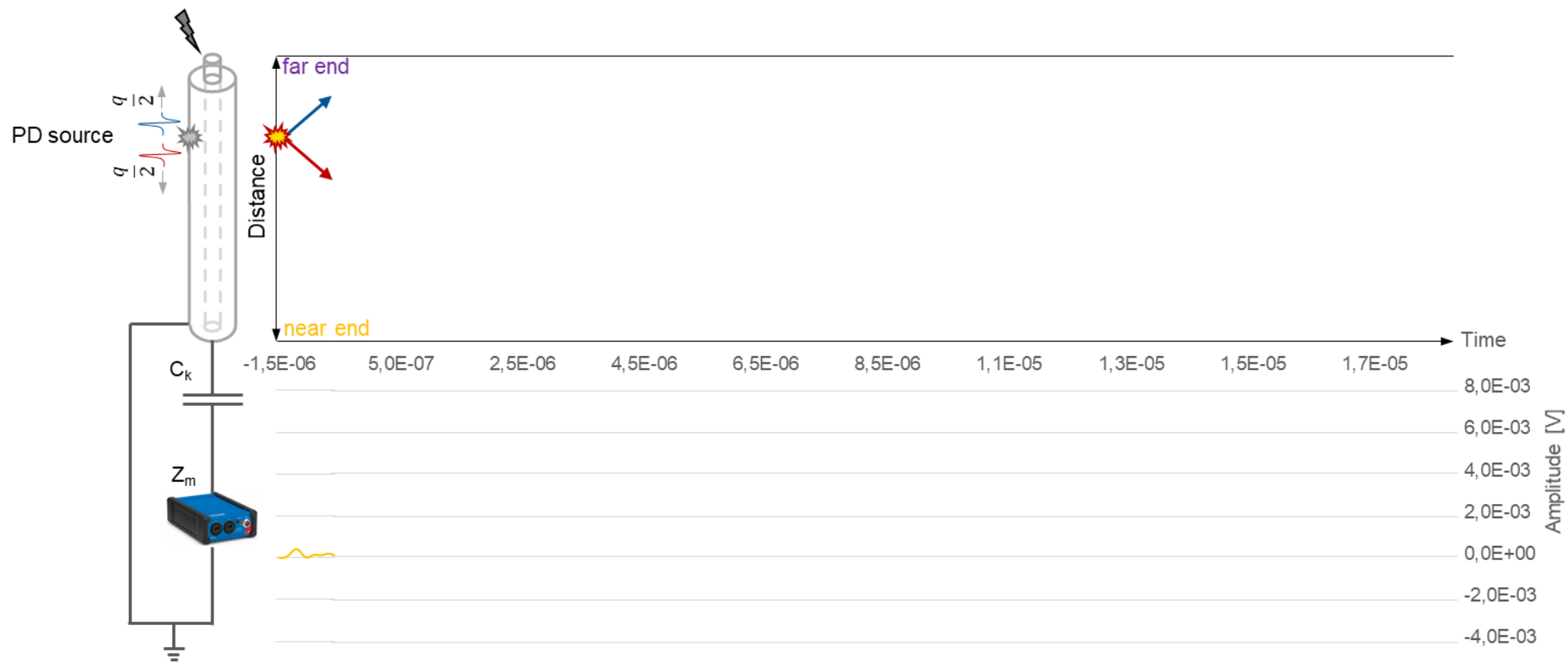
Obiekt
badań

C_k

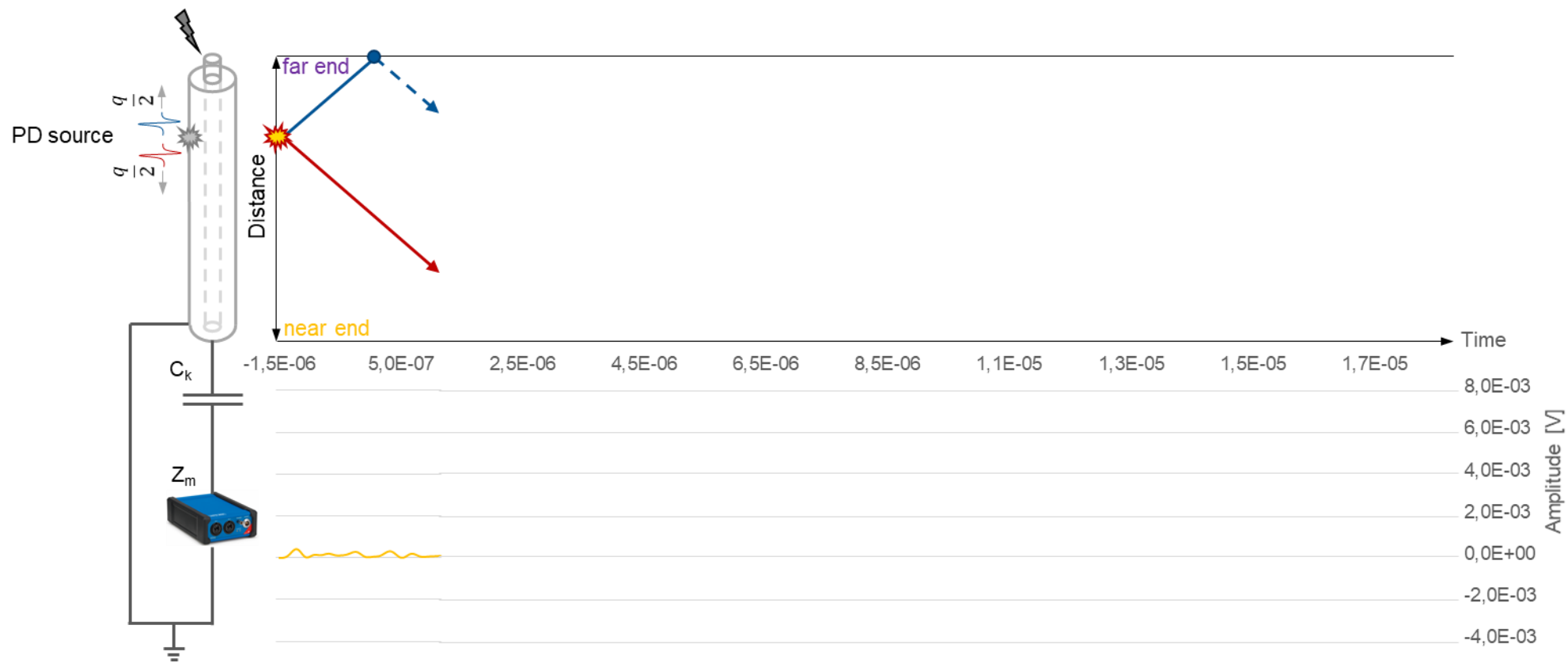
Jednostka
pomiarowa



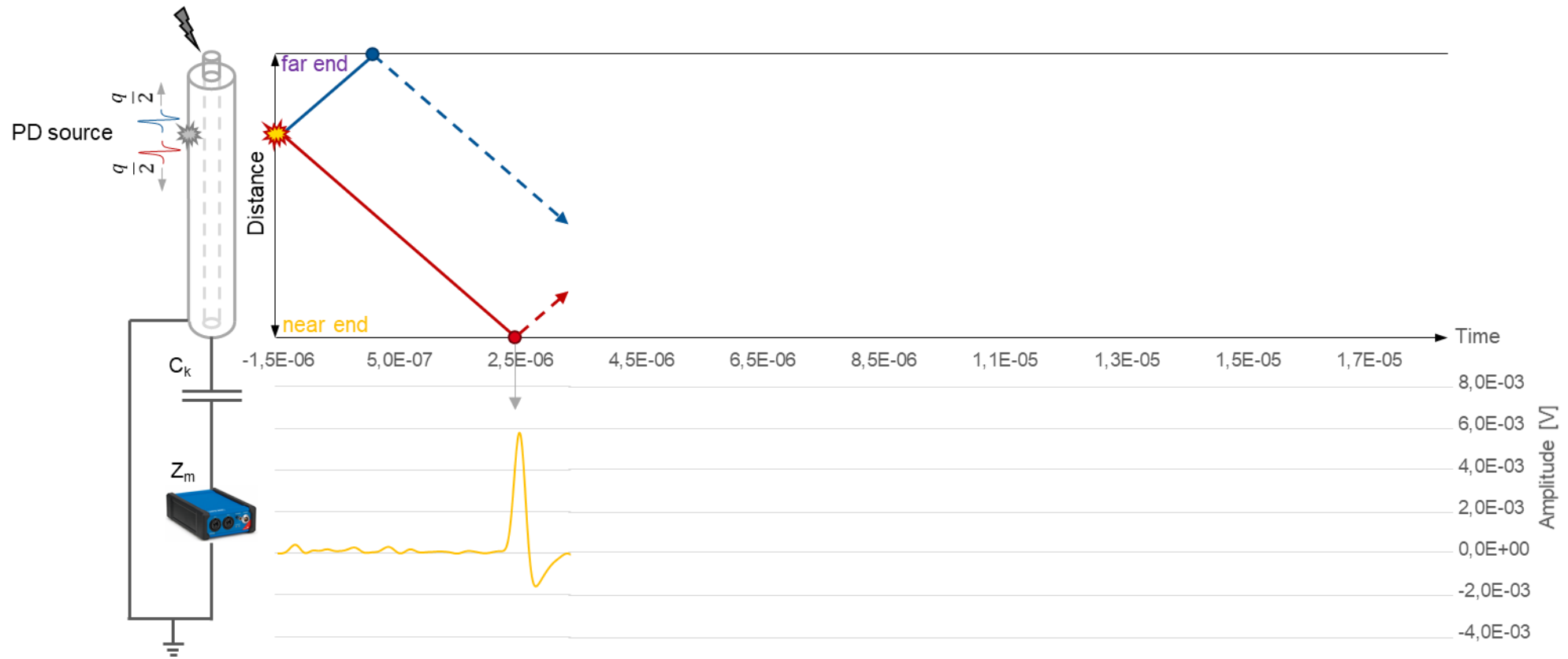
► Propagacja impulsu – TDR



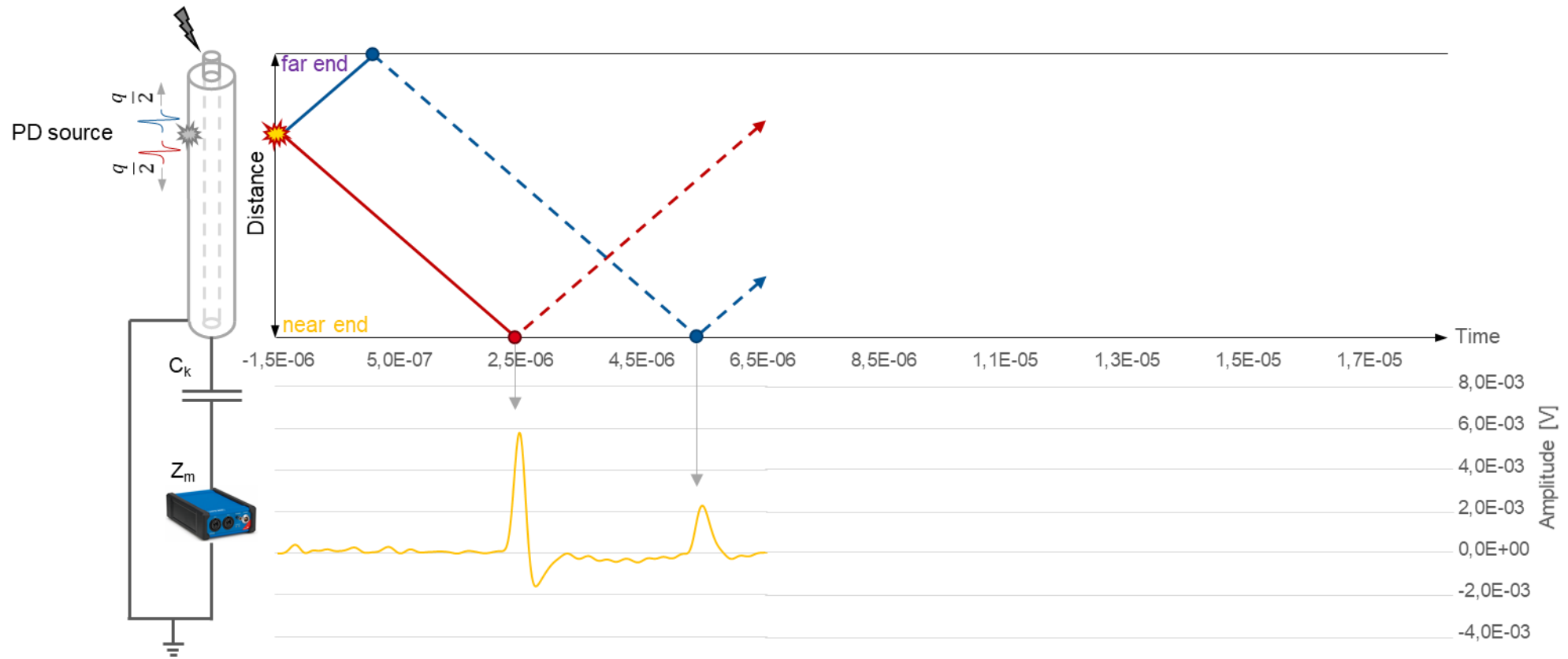
► Propagacja impulsu – TDR



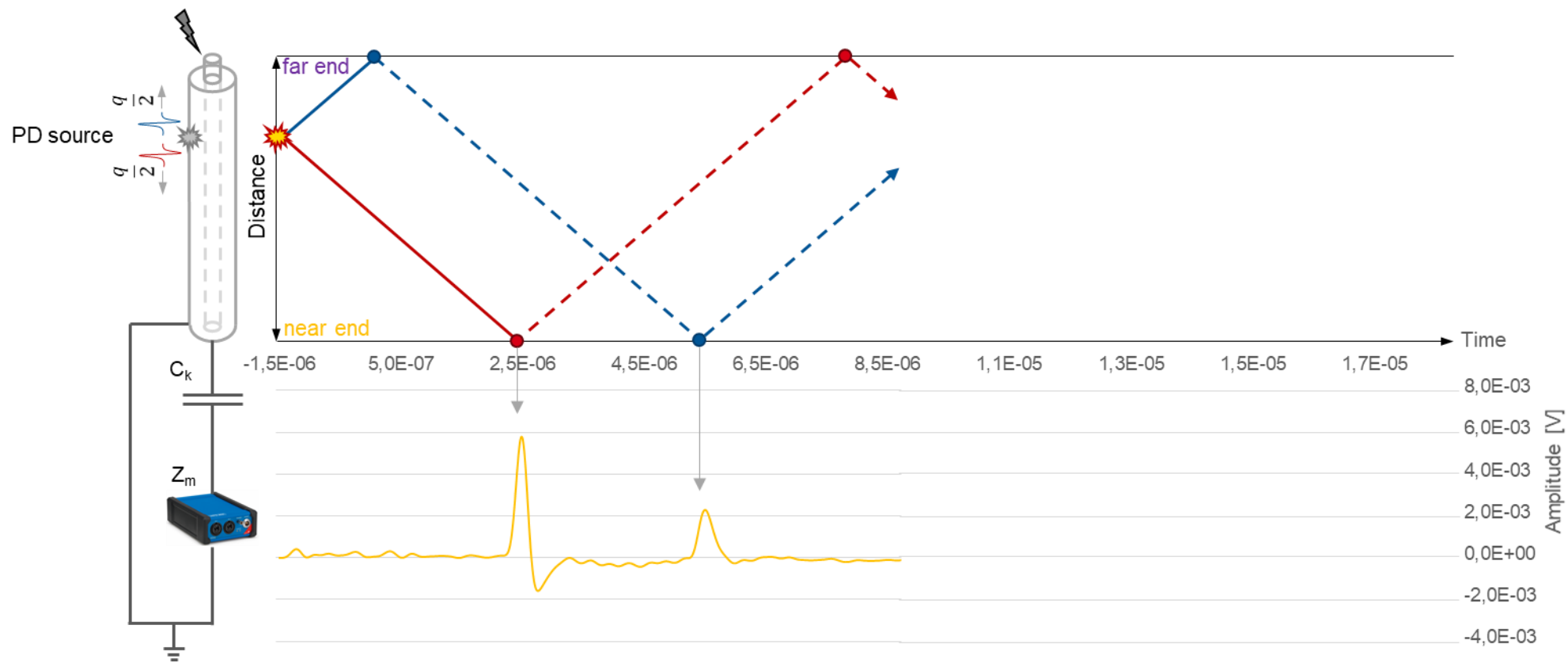
Propagacja impulsu – TDR



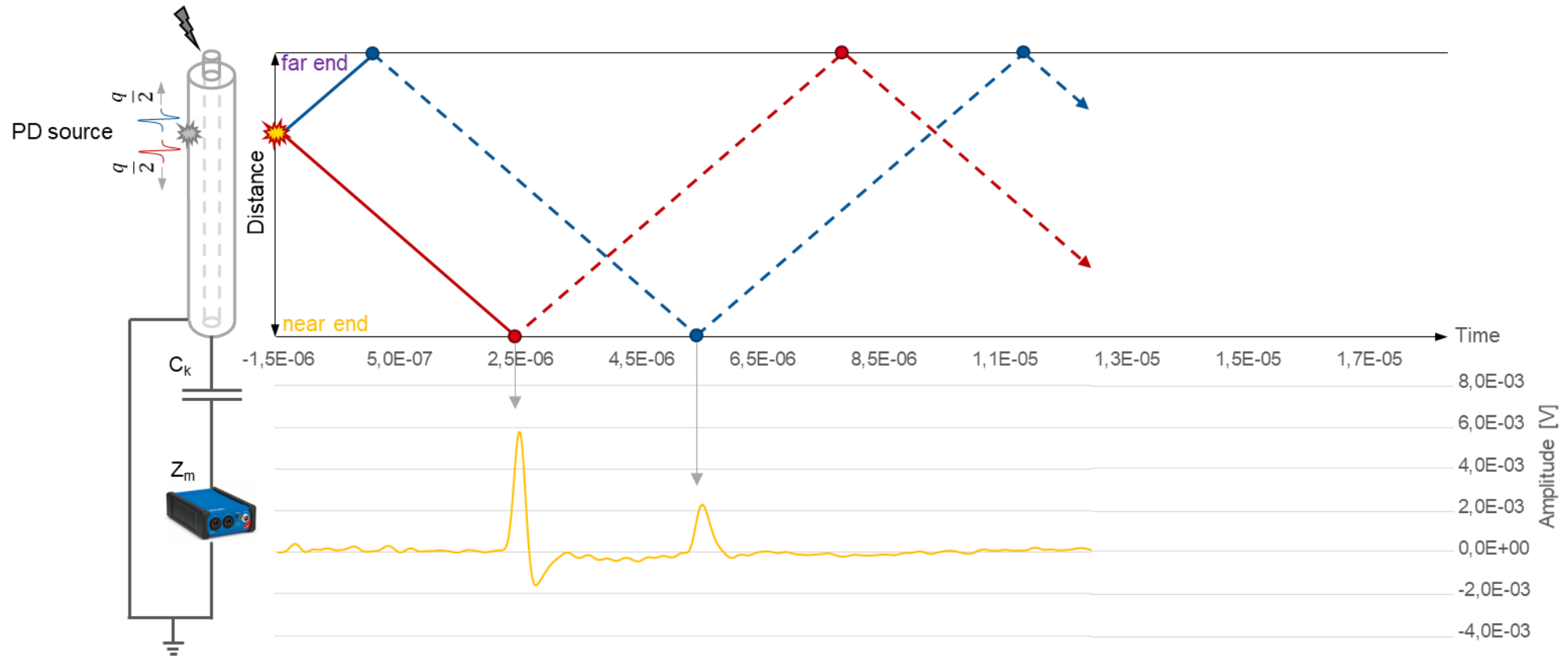
Propagacja impulsu – TDR



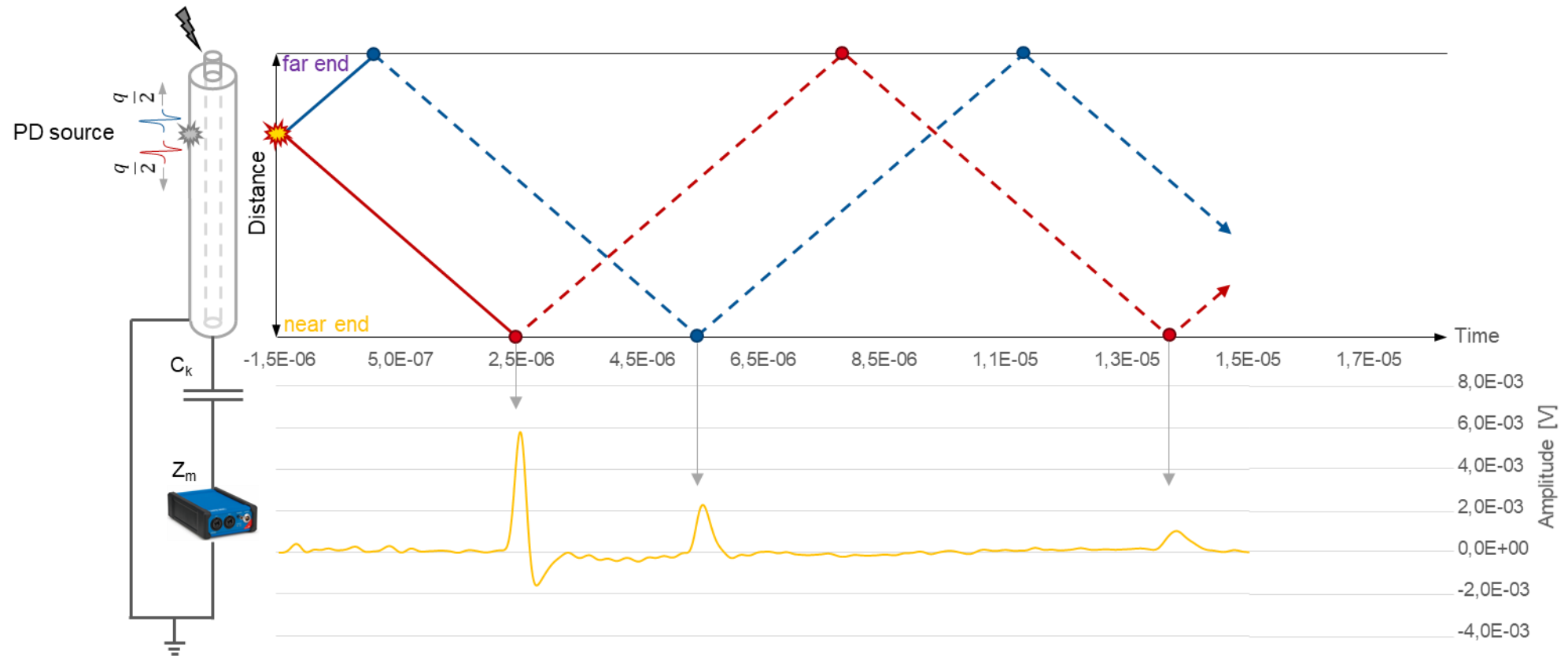
Propagacja impulsu – TDR



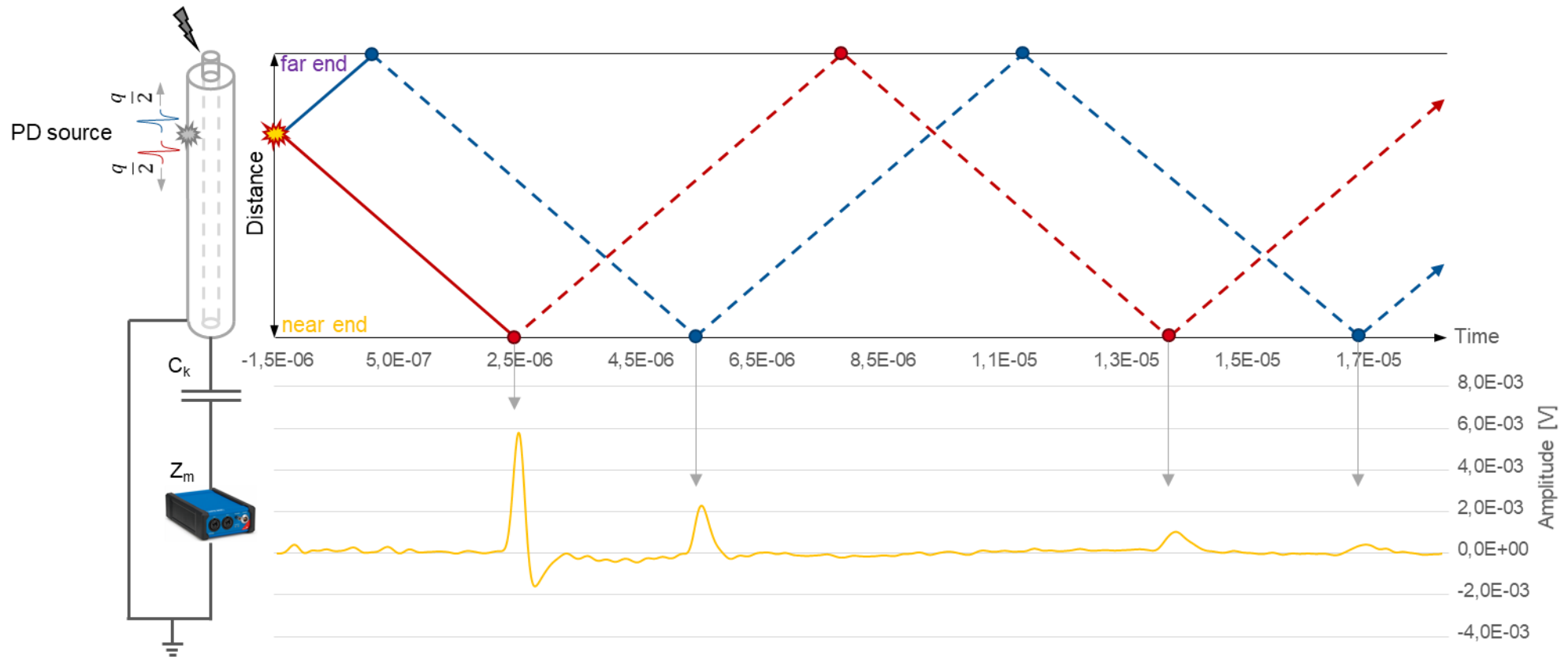
Propagacja impulsu – TDR



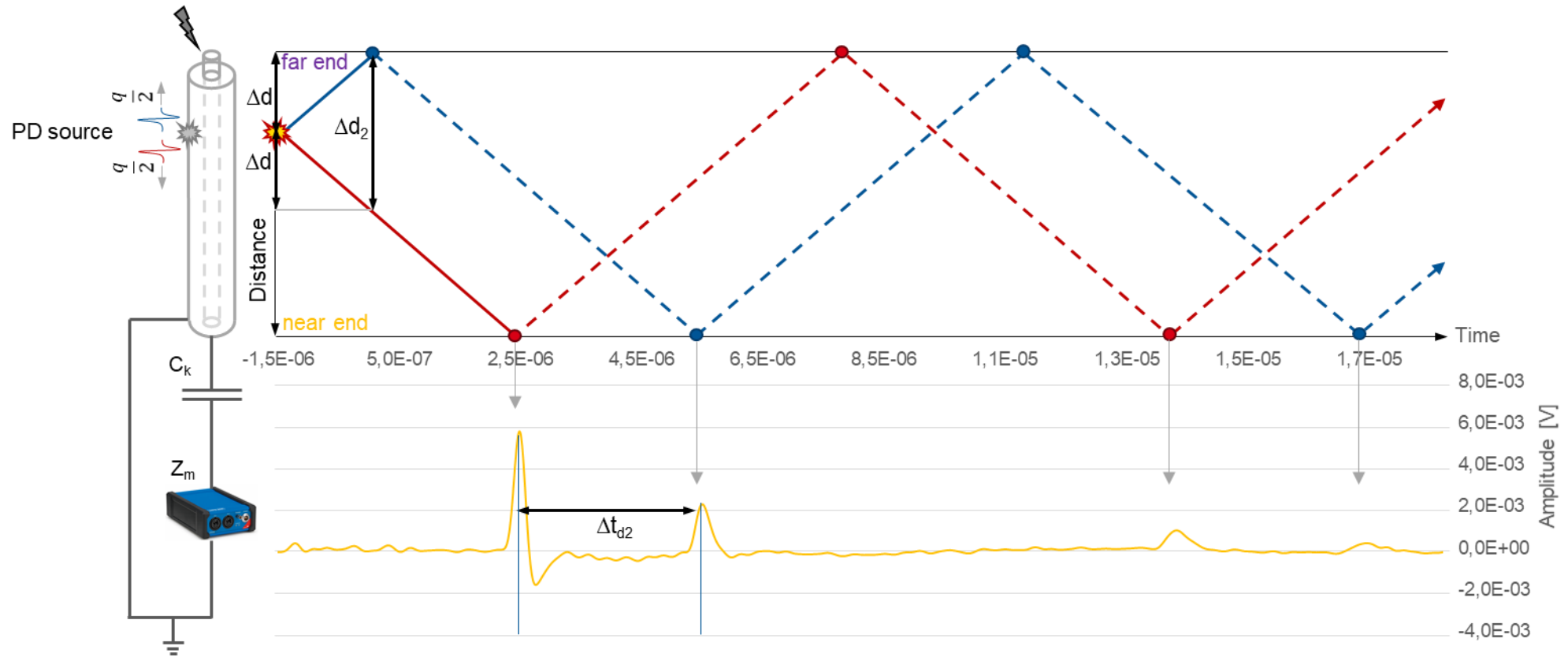
Propagacja impulsu – TDR



Propagacja impulsu – TDR



▶ Propagacja impulsu – TDR



▶ Lokalizacja źródła defektu od miejsca pomiaru:

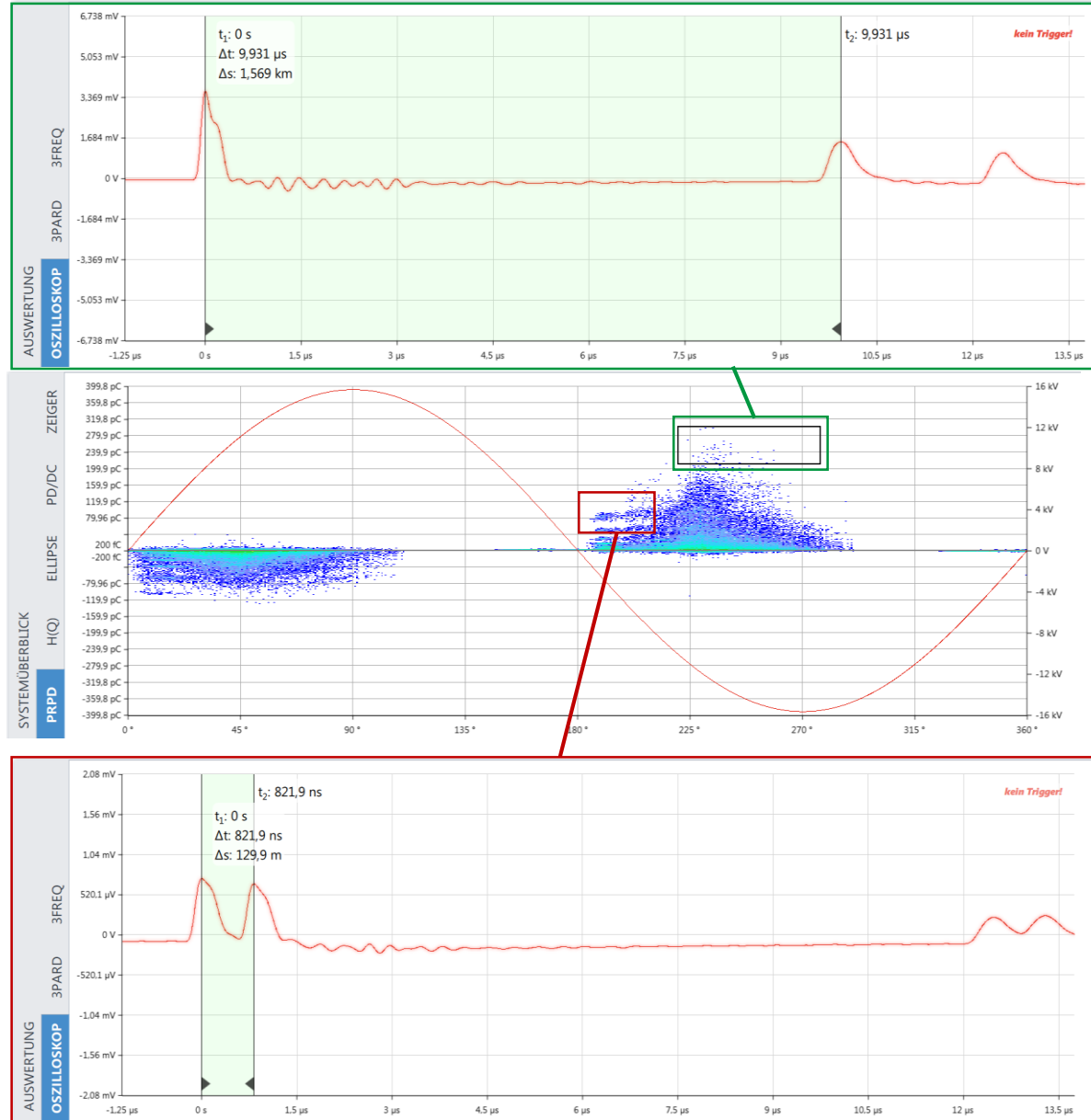
$$\Delta d = v \cdot \frac{\Delta t_{d2}}{2}$$



Cechy programowe zwiększające dokładność lokalizacji źródła / źródeł WNZ

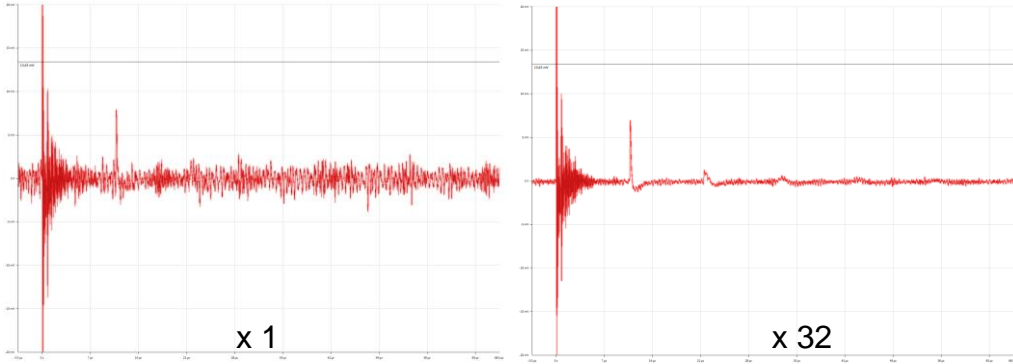
Cechy programowe – wyzwianie obszarem PRPD

- ▶ Obszar wyzwania PRPD umożliwia separację źródeł WNZ (zakłócenia, kilka defektów izolacji).
- ▶ Dokładniejsza lokalizacja źródła WNZ dla metody TDR lub sTDR.
- ▶ Możliwa lokalizacja więcej niż jednego źródła WNZ.



Cechy programowe & sprzętowe – filtry, uśrednianie

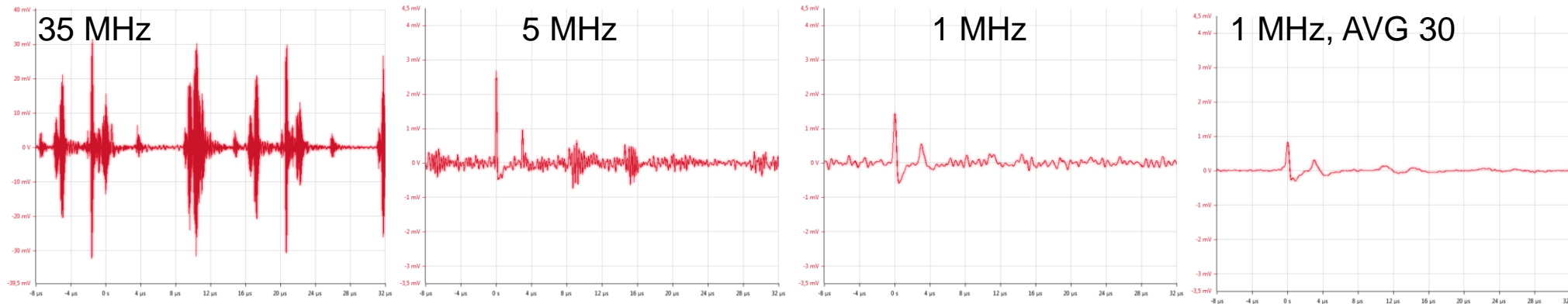
Uśrednianie



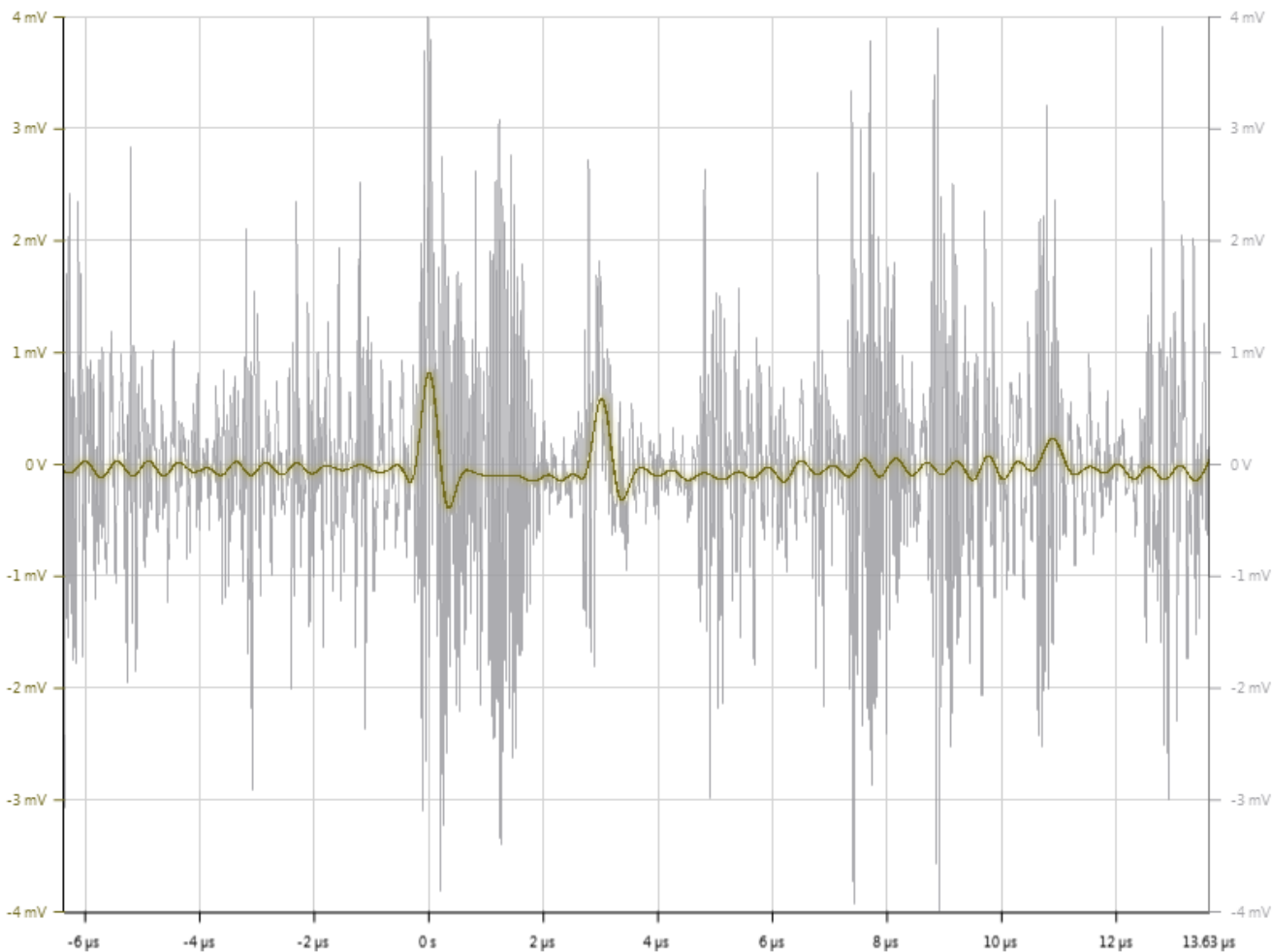
A/C filtr DP



Analizyczny filtr DP, GP, PP

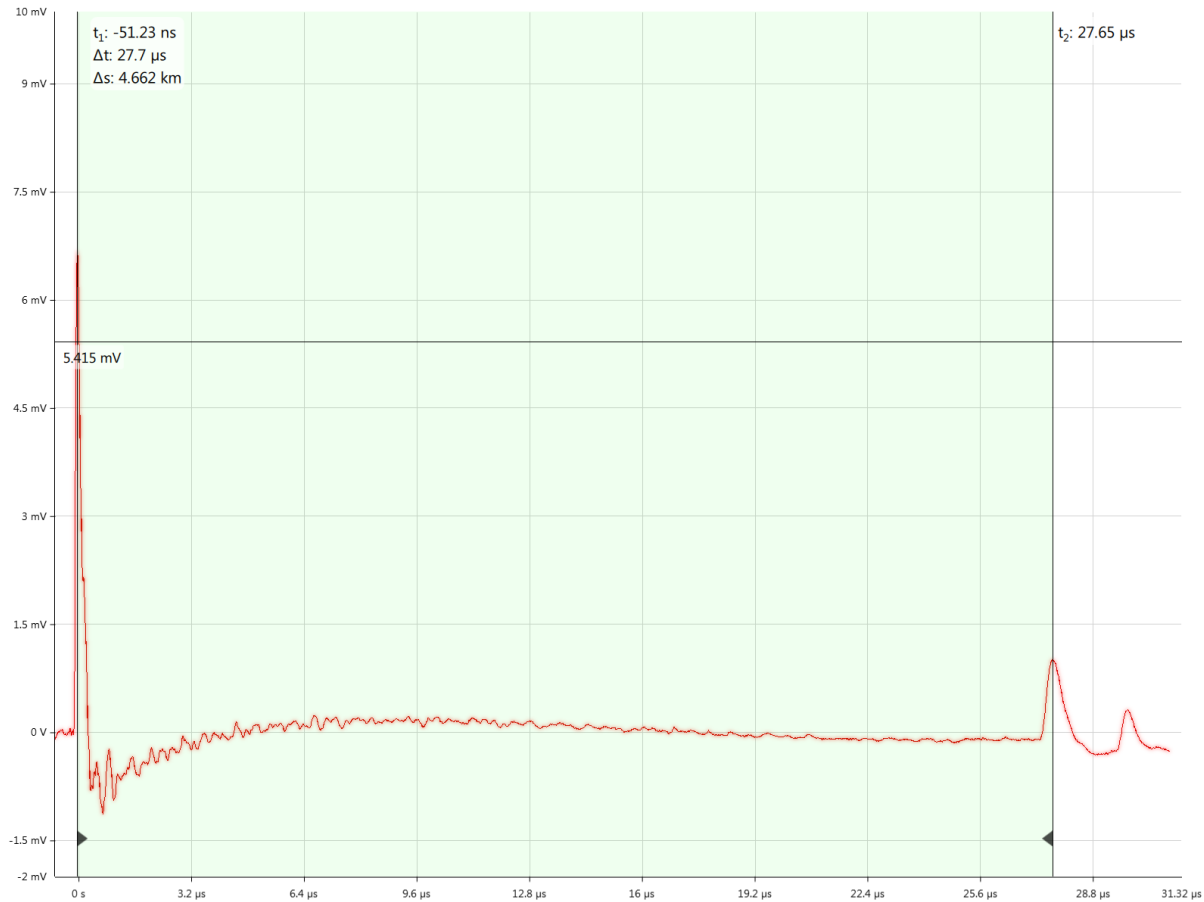


Cechy programowe – surowy vs odfiltrowany sygnał



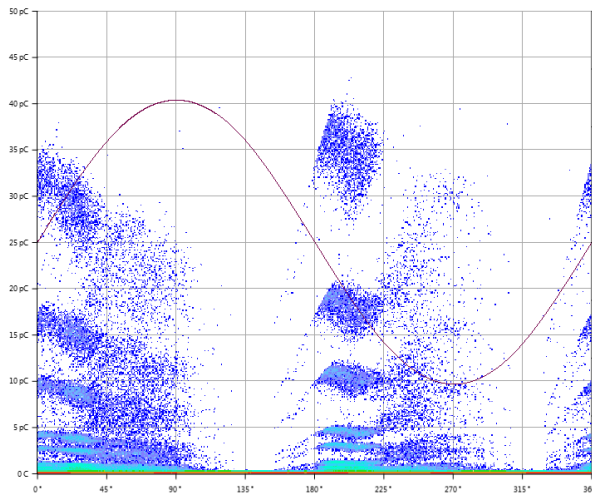
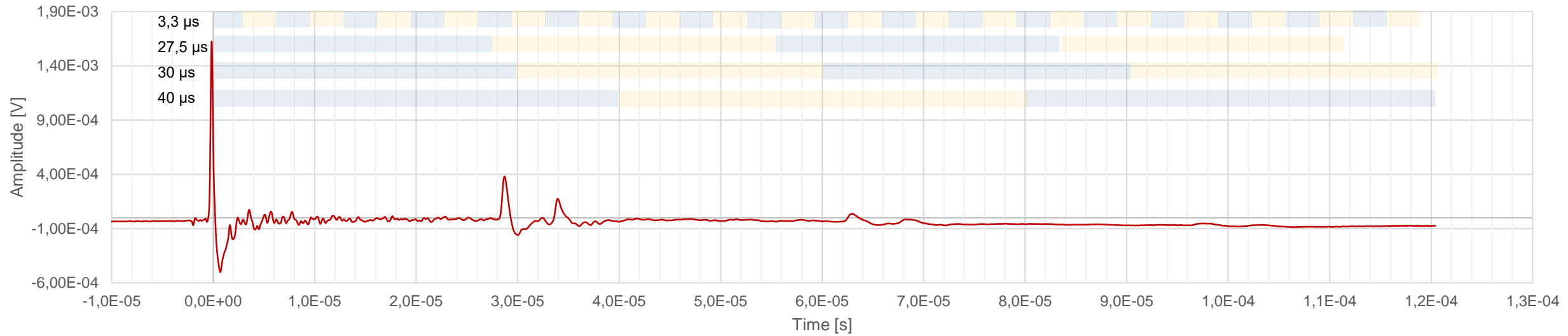
► TDR – punkt odniesienia do lokalizacji źródła WNZ

peak to peak
(4662 m)

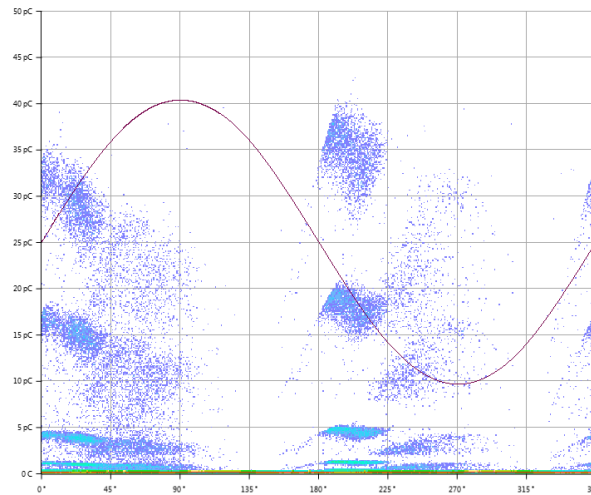


Wpływ ustawień filtrów cyfrowych (czas martwy) na obrazy PRPD

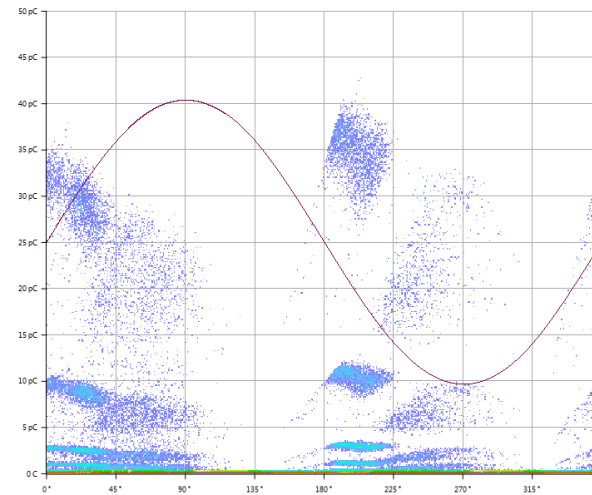
Częstotliwość filtrów A/C do pomiaru WNZ \neq lokalizacji miejsca WNZ



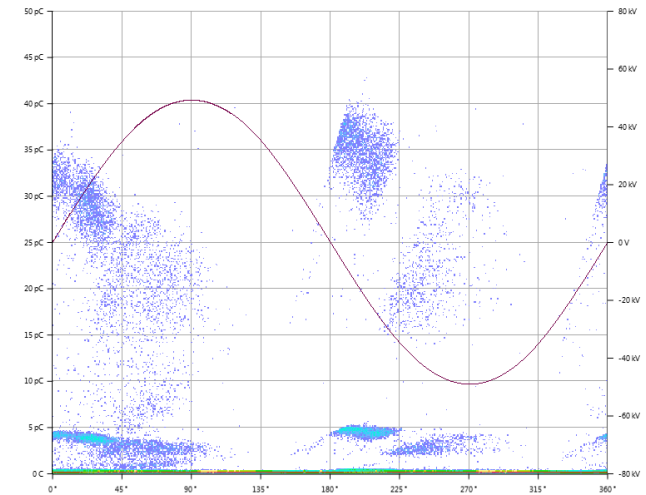
3,3 μ s



27,5 μ s



30 μ s



40 μ s



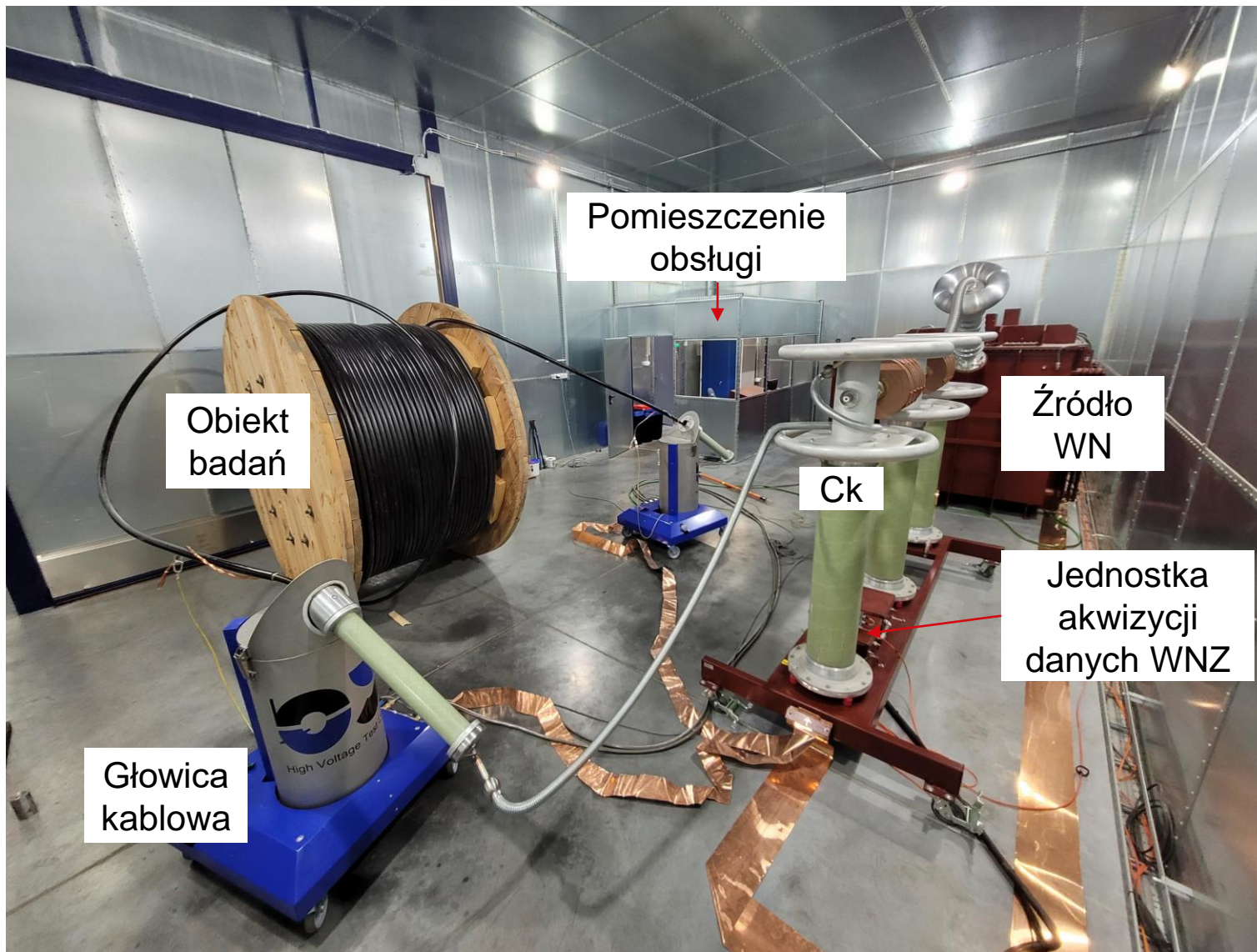
Studium przypadku

► Studium przypadków – pomiary WNZ w fabryce kabli SN

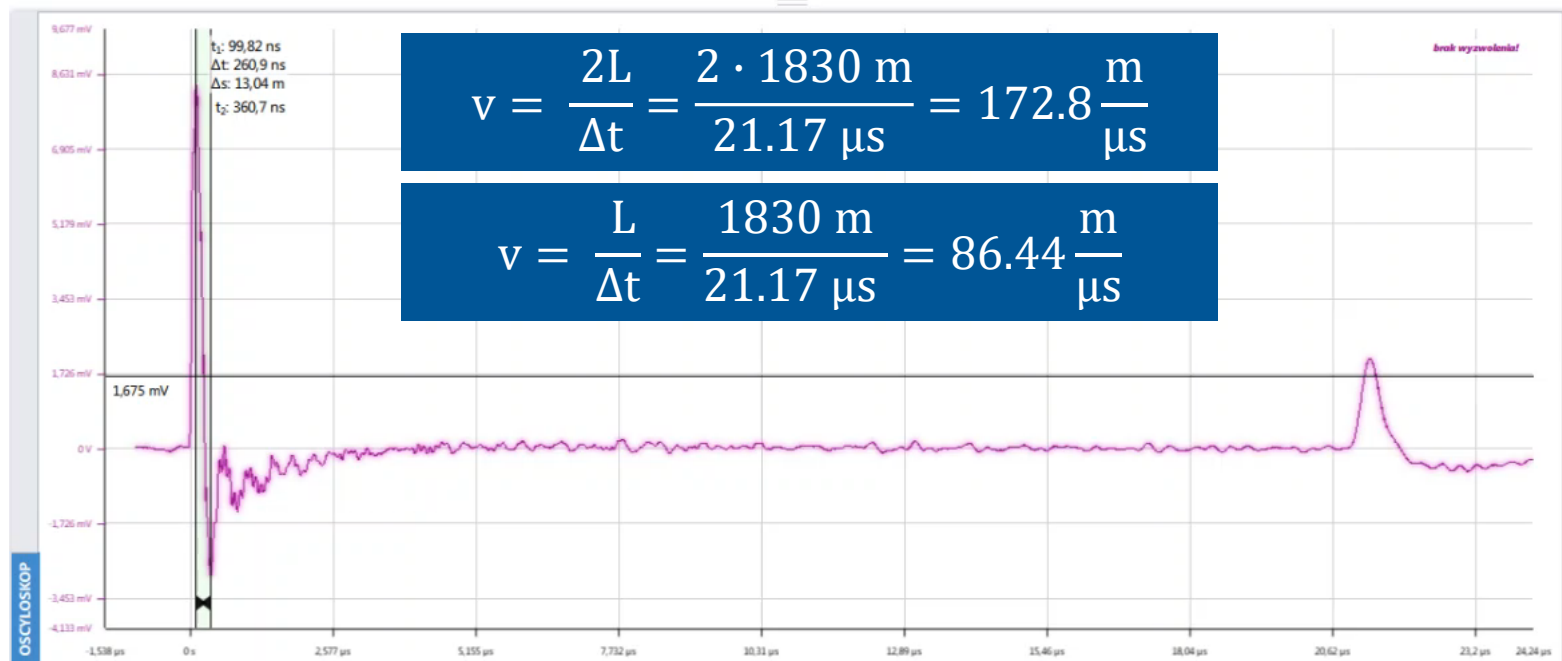
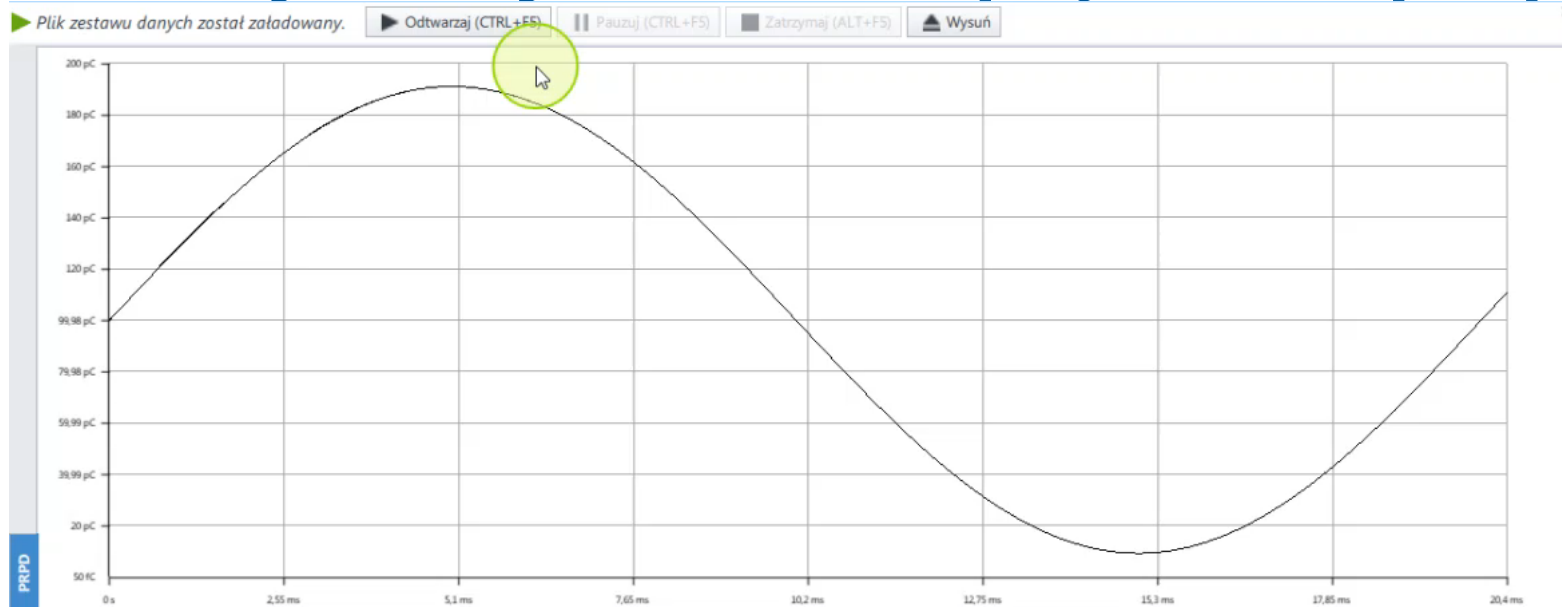


- ▶ XRUHAKXS 12-20 kV 1x240 1x50
- ▶ 12/20 kV XLPE
- ▶ Długość kabla:
 - ▶ (1) 1 503 m,
 - ▶ (2) 1 830 m,
 - ▶ (3) 1 124 m.

► Układ pomiarowy



Kalibracja & wyznaczanie prędkości propagacji sygnału



MPD 600 1.1

Q_{WTD}
123,8 pC
Integracja częstotliwości dla 250 kHz ± 150 kHz

0 impulsów w 0 s

Wskaźnik WNZ
174 071 impulsów/s

I_{nars}
51,25 μA

f_{linow.}
50,02 Hz

Status IEC 60270
Wymagana jest kalibracja.

Bramkowane fazy
0 %

Bramkowane zdarzenia
Bramkowanie kanału: 0 %
Bramkowanie 3PARD/3FREQ: 0 %
Bramkowanie PRPD: 0 %

f_{Q, WTD}
300,1 impulsów/s

Licznik #1 WNZ/DC
0 impulsów z ładunek WNZ ≥ 2 nC w ostatnich 0 s

Licznik #2 WNZ/DC
0 impulsów z ładunek WNZ ≥ 2 nC w ostatnich 0 s

L = 1830 m

USTAWIENIE I KALIBRACJA PRPD I AC OCENA RAPORTY

NAGRYWANIE/ODTWARZANIE TREND **DZIEDZINA CZASU I FFT**

WNZ/DC VLF LOKALIZACJA WNZ ZAAWANSOWANE

▼ Ustawienia zakresu

Włączono obraz oscyloskopowy WNZ

Tryb wyzwiania Wyzwalanie krawędziowe

Zbocze sygnału wyzwialacza Zbocze narastające

Sprzętowy tryb uśredniania 16x

Wartość progowa wyzwiania 1,675 mV

Czas przed zadziałaniem wyzwialacza 1 μs

▼ Ustawienia diagramu zakresu

Podstawa czasu 2,577 μs/dz

Przesunięcie czasu 11,35 μs

Automagiczne skalowanie osi pionowych włączone

Skala pionowa osi głównej 1,726 mV/dz

Przesunięcie pionowe osi głównej 2,772 mV

Skala pionowa osi pomocniczej 1 mV/dz

Przesunięcie pionowe osi pomocniczej -4 mV

Wyświetlane wskaźniki wyzwiania

▼ Ustawienia znacznika zakresu

Włączone znaczniki pomiarowe

Przyciągane do lokalnego minimum/maksimum

Pozycja znacznika 1 99,82 ns

Pozycja znacznika 2 360,7 ns

Prędkość propagacji 50 m/μs

► Eksportuj dane oscyloskopu WNZ jako plik CSV

▼ Kanały zakresu i FFT do wyświetlenia

MPD 600 1.1

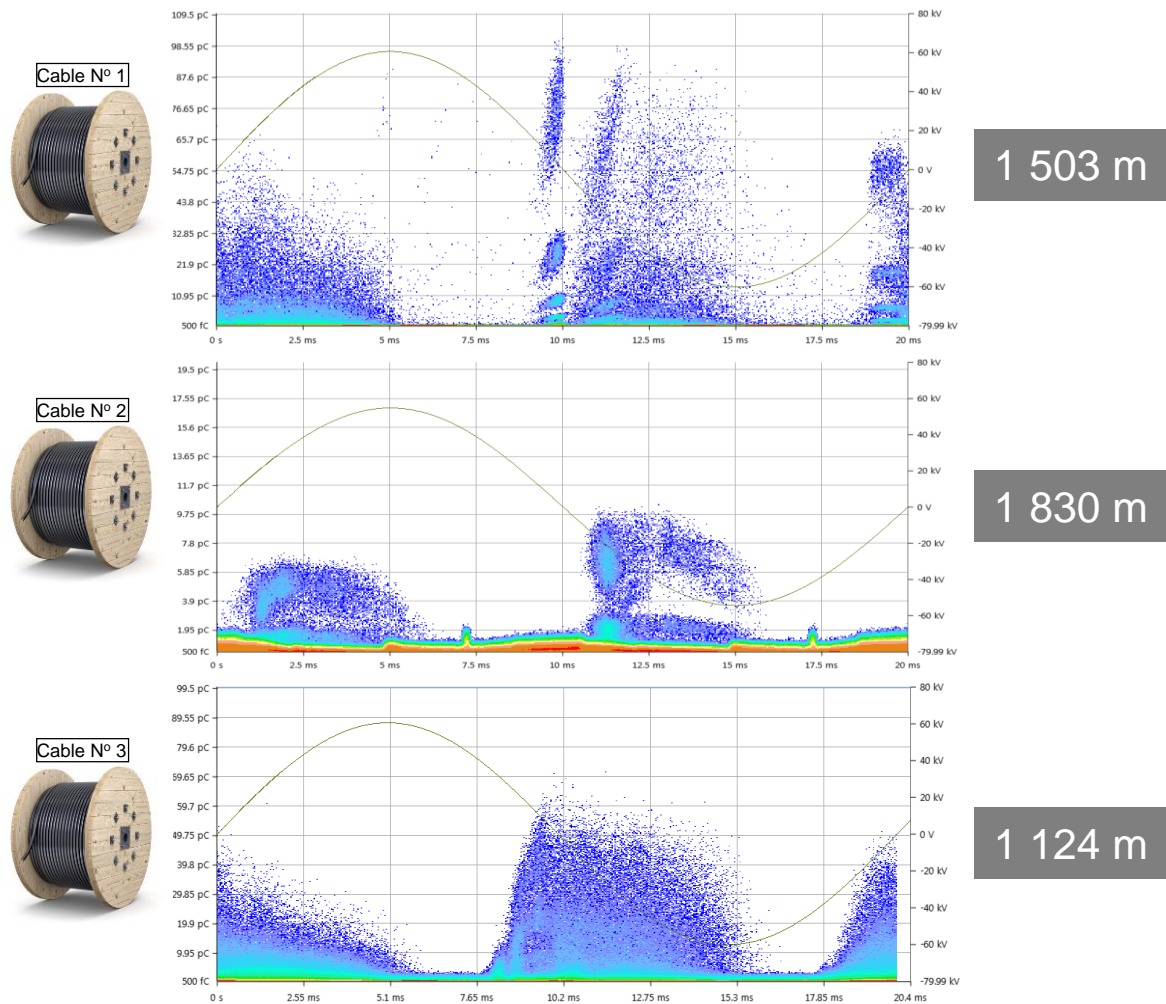
▼ Ustawienia FFT

Typ okna FFT Kaisera

▼ Ustawienia wykresu FFT

Skala pozioma 2 MHz/dz

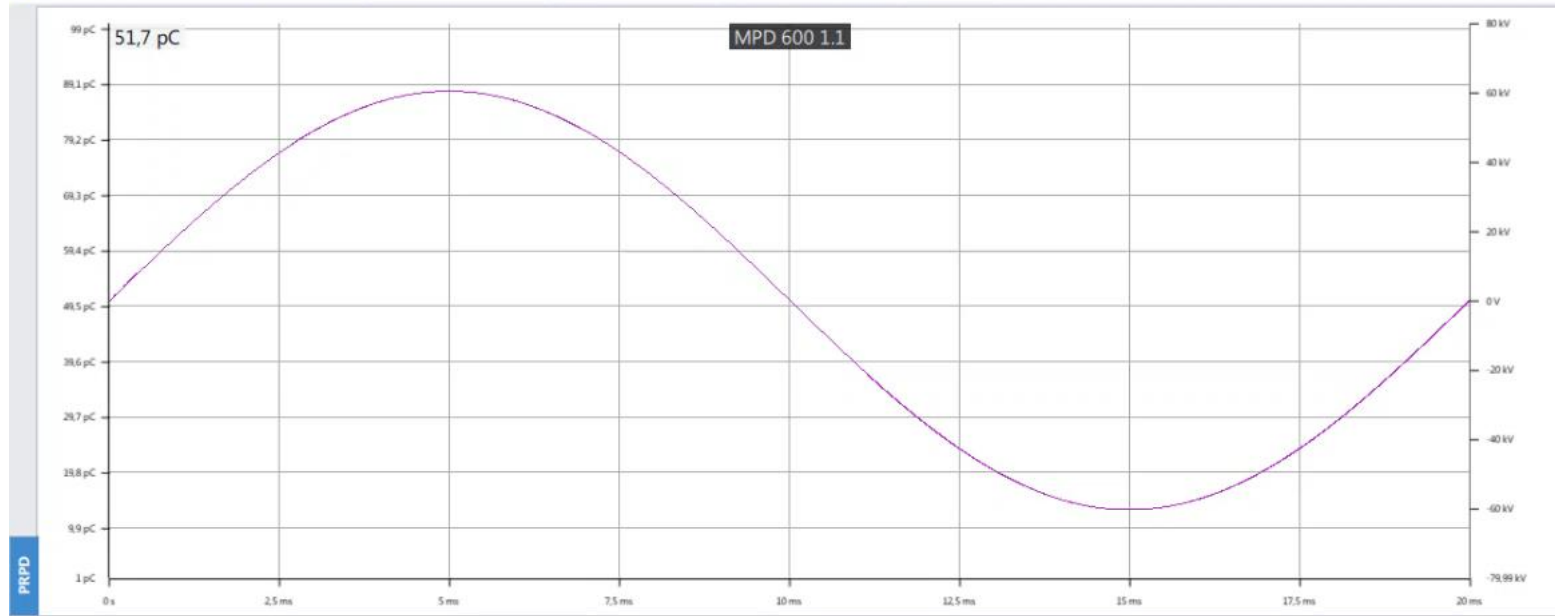
Wyniki pomiarów WNZ na długich odcinkach kablowych



Obrazy PRPD, skala liniowa, jednobiegunowa
 $f_c = 250 \text{ kHz}$, $BDW = 300 \text{ kHz}$

Przykład kabla nr 1 – 1 503 m

▶ Plik zestawu danych został załadowany. ▶ Odtwarzaj (CTRL+F5) || Pauzuj (CTRL+F5) ■ Zatrzymaj (ALT+F5) ▲ Wsuń



MPD 600 1.1

Q_{WTD}
51,7 pC
Integracja częstotliwości dla 657,2 kHz ± 500 kHz

Wskaźnik WNZ
87 072 impulsy/s

V_{RMS MPD 600 1.1}
42,71 kV
Q/√2_{MPD 600 1.1}
42,7 kV

I_{RMS MPD 600 1.1}
13,43 A

f_{AC MPD 600 1.1}
50,03 Hz

Status IEC 60270
Ustawienia detekcji WNZ są poza zalecanym zakresem: Zbyt wysoka dolna częstotliwość graniczna.

f_{Q, WTD}
20,99 impulsów/s

USTAWIENIE I KALIBRACJA PRPD I AC OCENA RAPORTY

NAGRYWANIE/ODTWARZANIE TREND DZIEŃCINA CZASU I FFT ZAAWANSOWANE

WNZ/DC VLF LOKALIZACJA WNZ

▼ Synchronizacja WNZ/AC

MPD 600 1.1 50,03 Hz

► Dodatkowe opcje

▼ Ustawienia wykresu PRPD

Tryb widoku Jednobiegunowy liniowy

Q_{Maks.} 100 pC

Q_{Min.} 1 pC

Wyświetlone sygnały WNZ

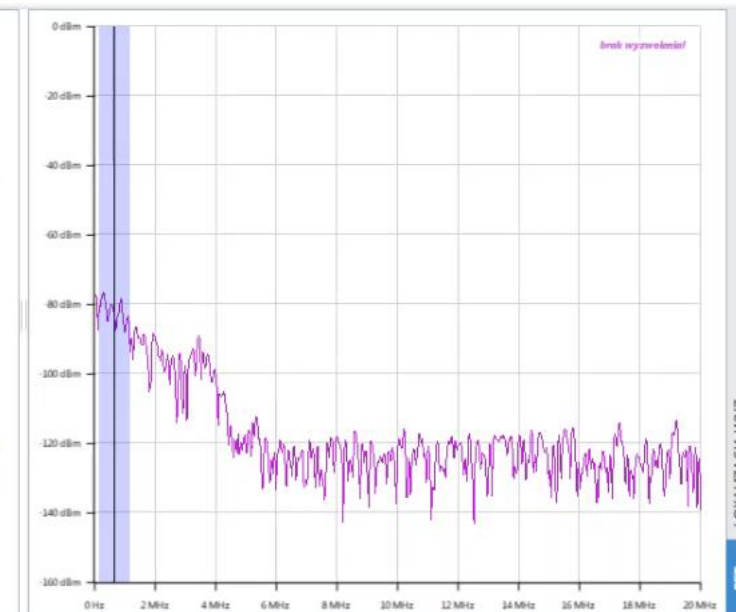
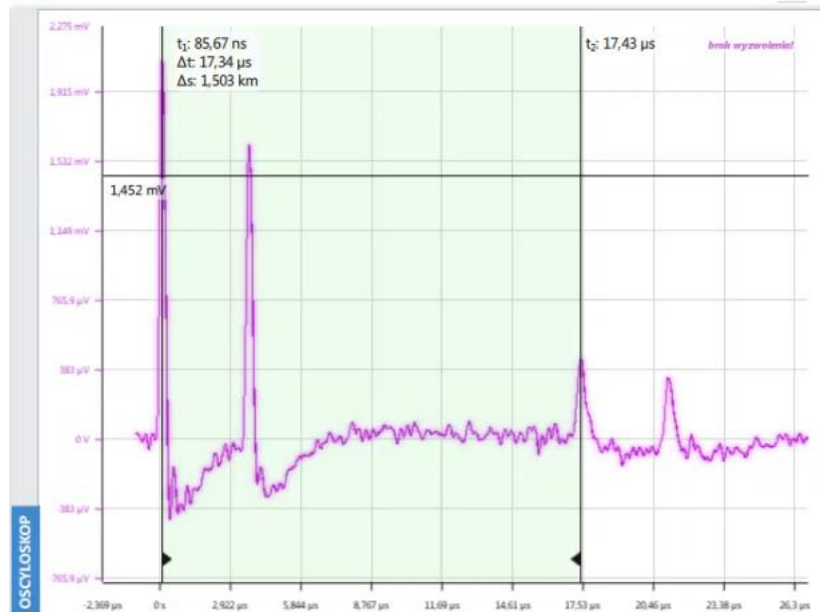
► Ręczne ustawianie wartości progowej detekcji WNZ

▼ Opcje rejestracji PRPD

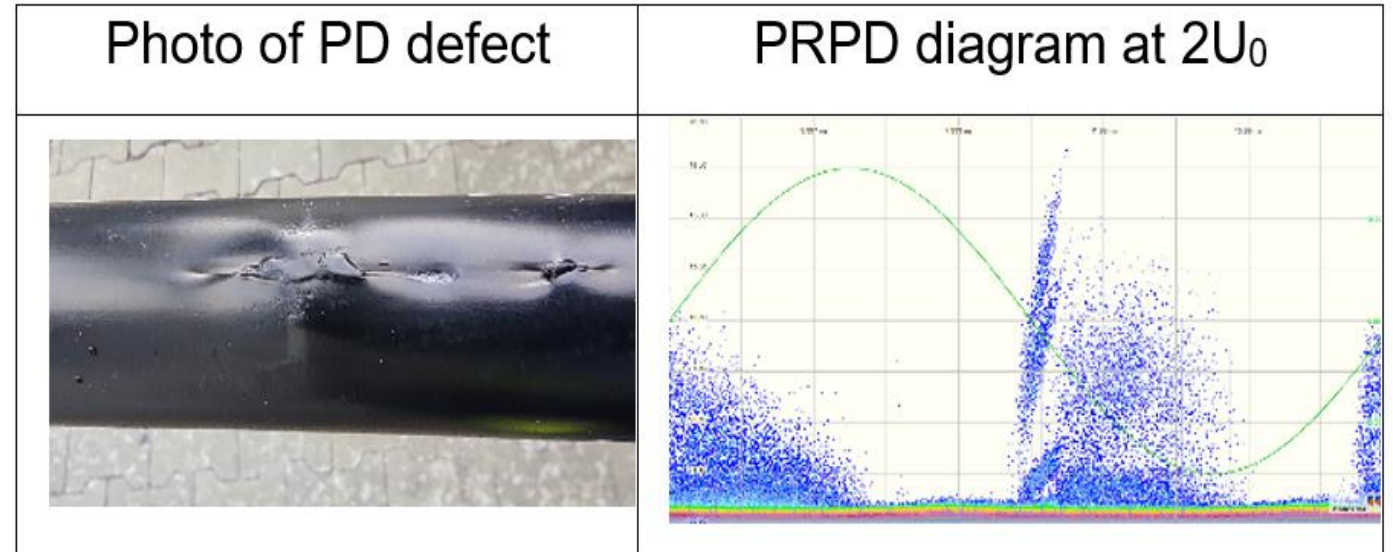
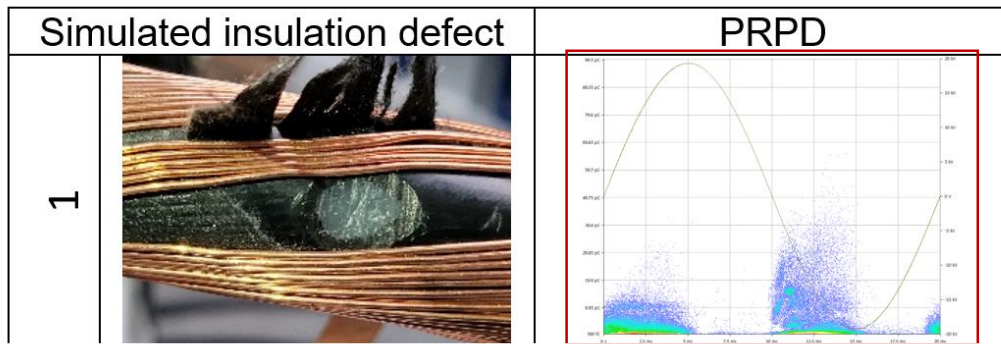
Rejestruj PRPD (F5) Wyczyść PRPD

Rejestracja w czasie Rejestruj dla 30 s

Symulowanie włączone



Wyniki pomiarów WNZ symulowanych defektów izolacji



Porównanie obrazów WNZ dla próbek z symulowanym i rzeczywistym defektem izolacji podczas próby rutynowej.

▶ Podsumowanie

- ▶ Pewność rozpoznania defektu WNZ i dokładność jego lokalizacji można poprawić dzięki zaawansowanym funkcjom sprzętowym i programowym systemu pomiarowego WNZ:
 - ▶ wyzwalenie poprzez zaznaczenie obszaru PRPD – pozwala użytkownikowi wybrać interesujący obszar obrazu PRPD, który działa jako warunek wyzwalenia sygnału w dziedzinie czasu (TDR, ToF).
 - ▶ Filtrowanie może być wykonywane za pomocą dowolnie wybieranych filtrów cyfrowych o różnych charakterystykach, a także uśredniania wielu ujęć w celu zwiększenia jakości sygnału.
- ▶ Tworzenie bazy danych wzorców WNZ ze znanymi defektami przydatne, ponieważ pozwala przyspieszyć proces poszukiwania oraz eliminacji defektu.



Lokalizacja i rozpoznawanie defektów WNZ w kablach elektroenergetycznych o izolacji wytłaczanej

Tomasz Bednarczyk, Udo Ranninger, Wojciech Kołtunowicz – OMICRON

Piotr Grabowski, **Elpar**
FABRYKA KABLI

Maciej Łuszcz

 **CCS**
Cable Complex Solutions

KABEL

2024

XXIX KONFERENCJA SZKOLENIOWO-TECHNICZNA
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI KABLOWE I NAPOWIETRZNE

12-15 marca 2024

Lidzbark Warmiński

Hotel Krasicki****