

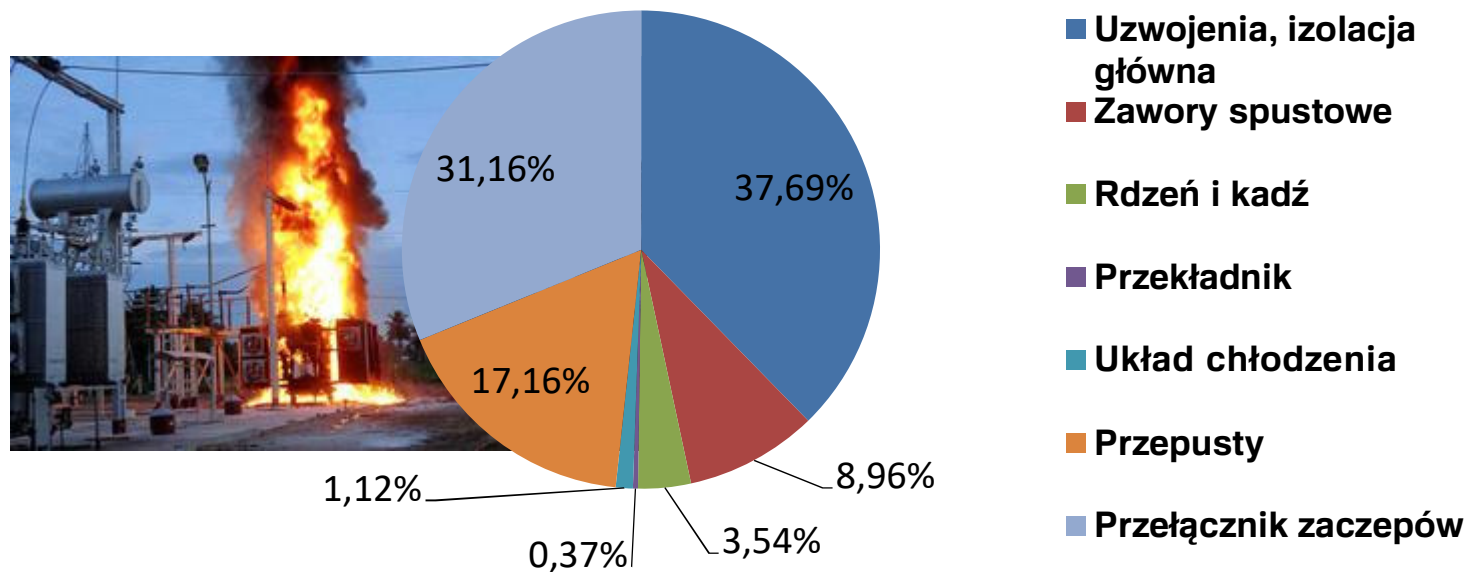


Lokalizacja i monitoring on-line wyłądowań niezuppełnych w transformatorach energetycznych

dr inż. Wojciech Sikorski

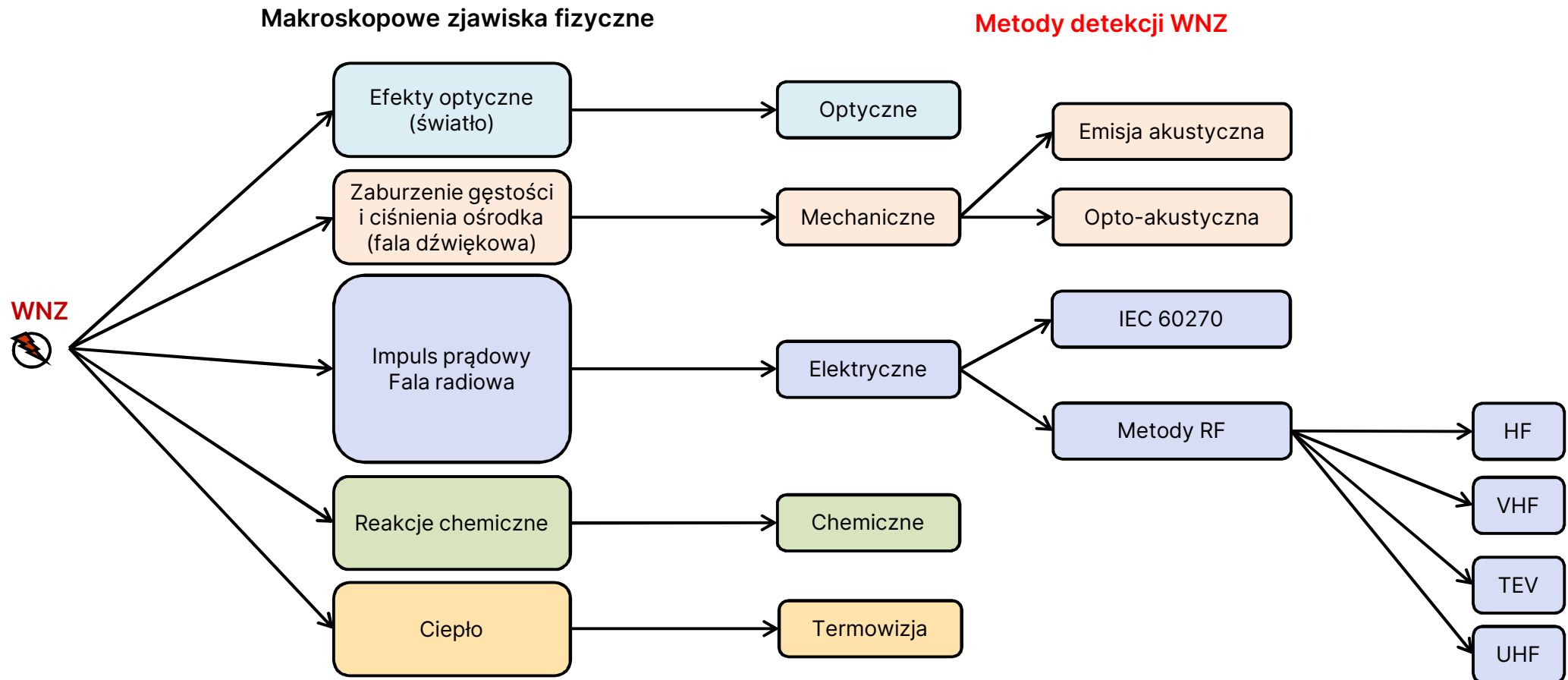
METODY DETEKCJI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W TRANSFORMATORACH

Według najnowszych analiz*, za jedną z głównych przyczyn awarii transformatorów energetycznych uważa się uszkodzenie izolacji głównej spowodowane destrukcyjnym działaniem **wyładowań niezupełnych**.

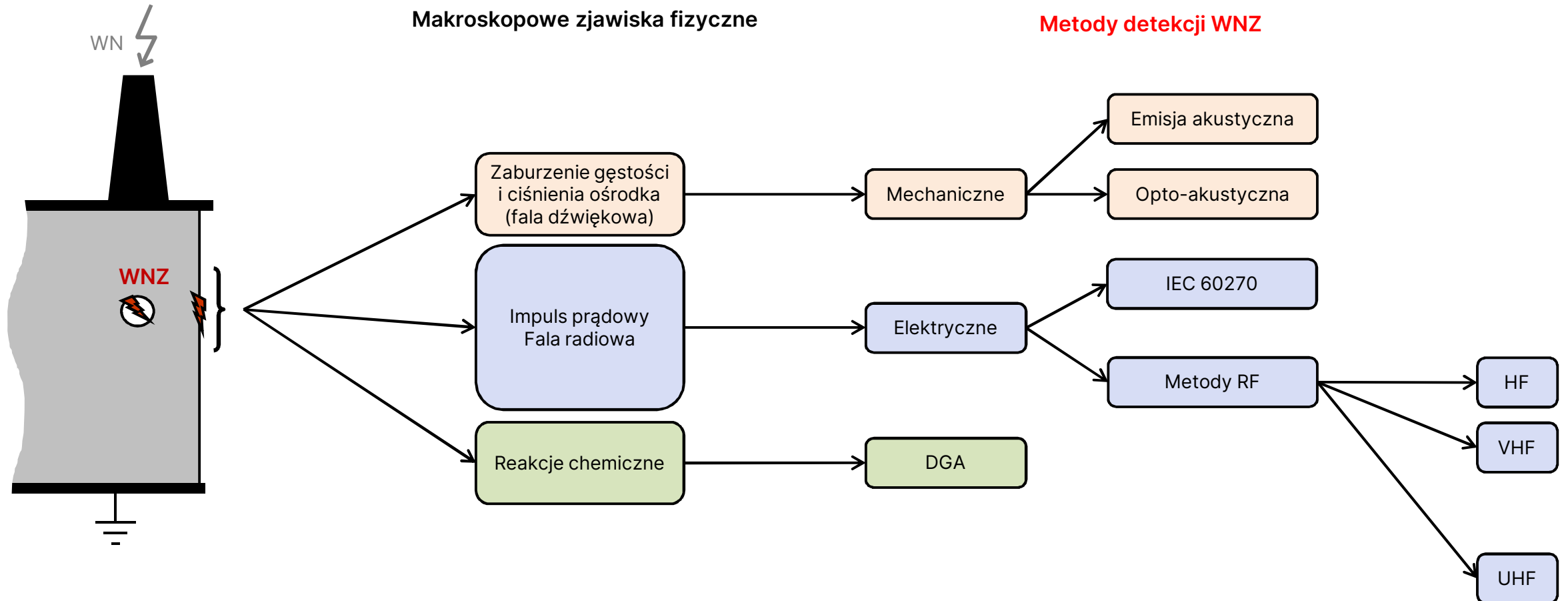


* CIGRÉ WG A2.37: Transformer Reliability Survey
CIGRÉ WG A2.45: Transformer failure investigation and post-mortem analysis

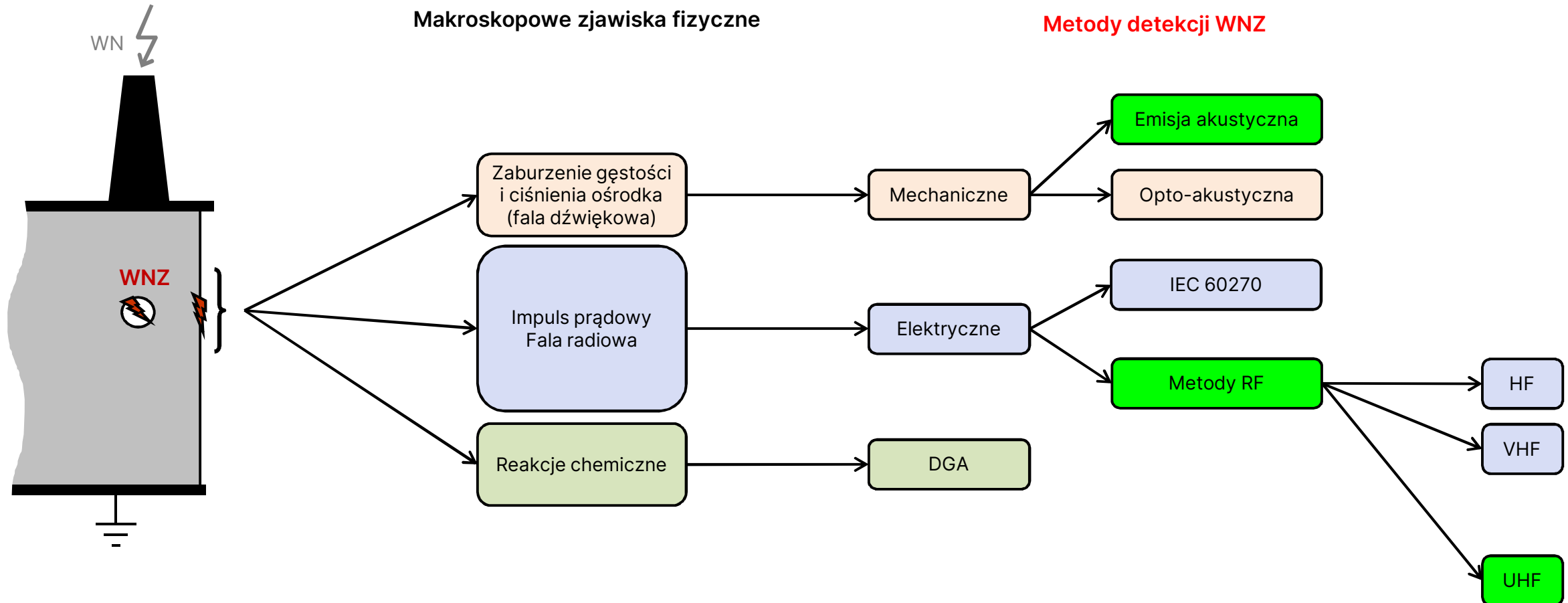
Metody detekcji wyładowań niezupełnych



Metody detekcji wyładowań niezupełnych w transformatorach energetycznych

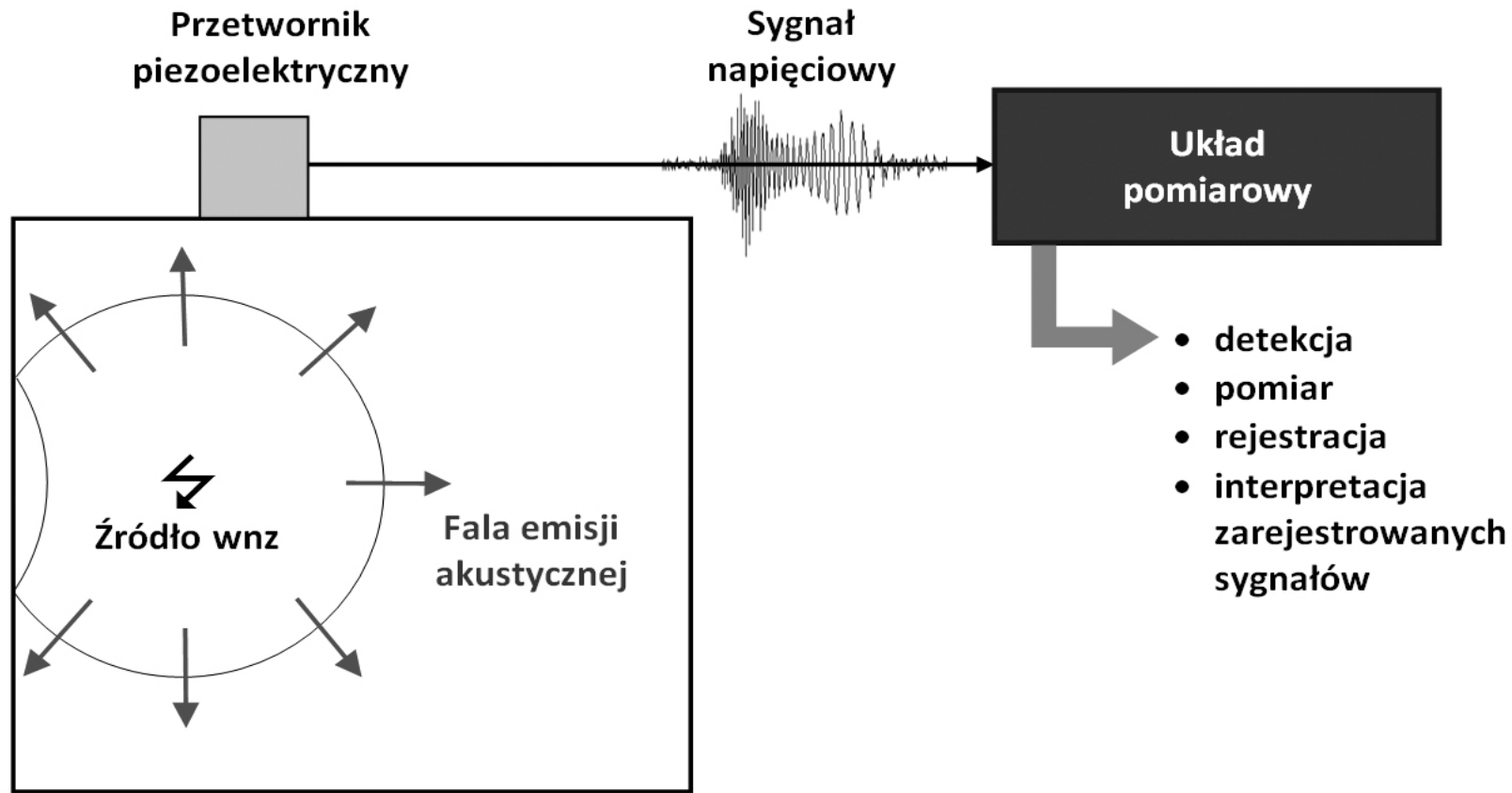


Metody detekcji wyładowań niezupełnych w transformatorach energetycznych:

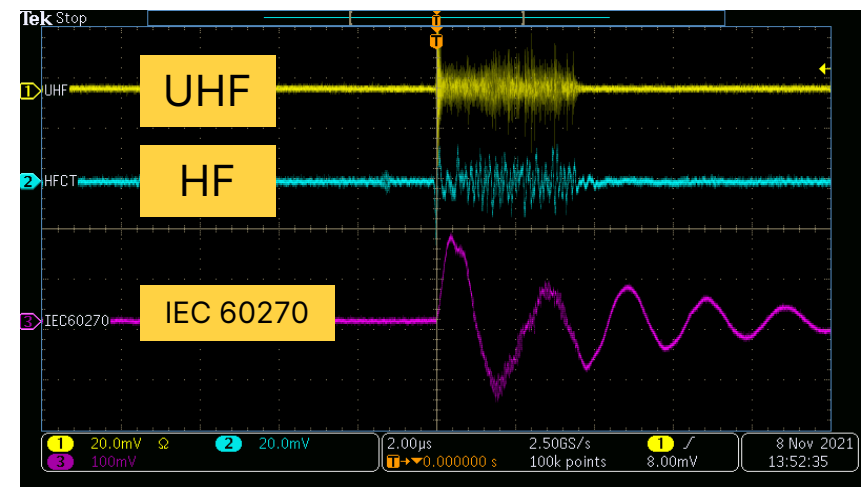
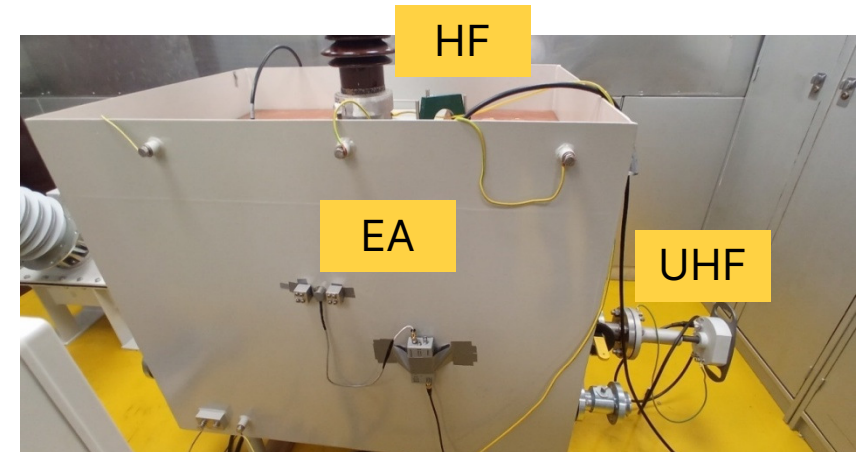
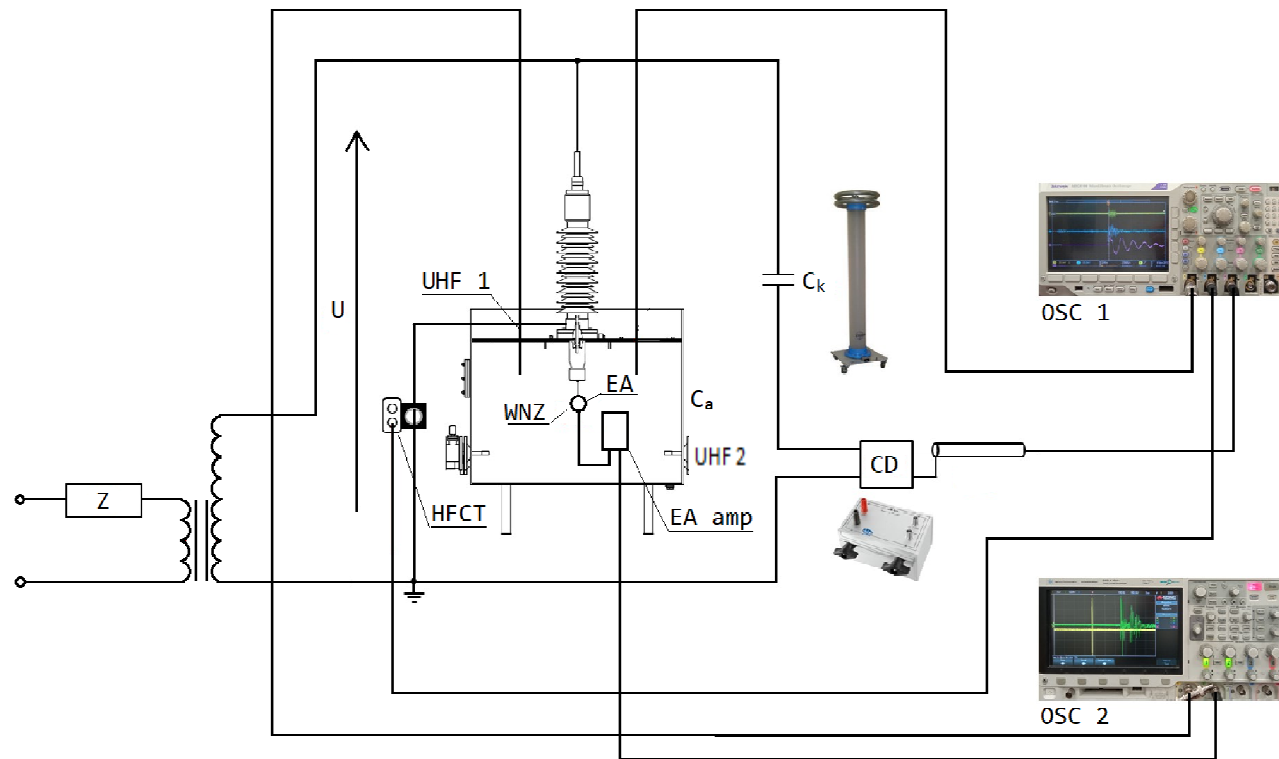


>>> Metoda emisji akustycznej (EA) <<<

Metoda emisji akustycznej – podstawy fizyczne

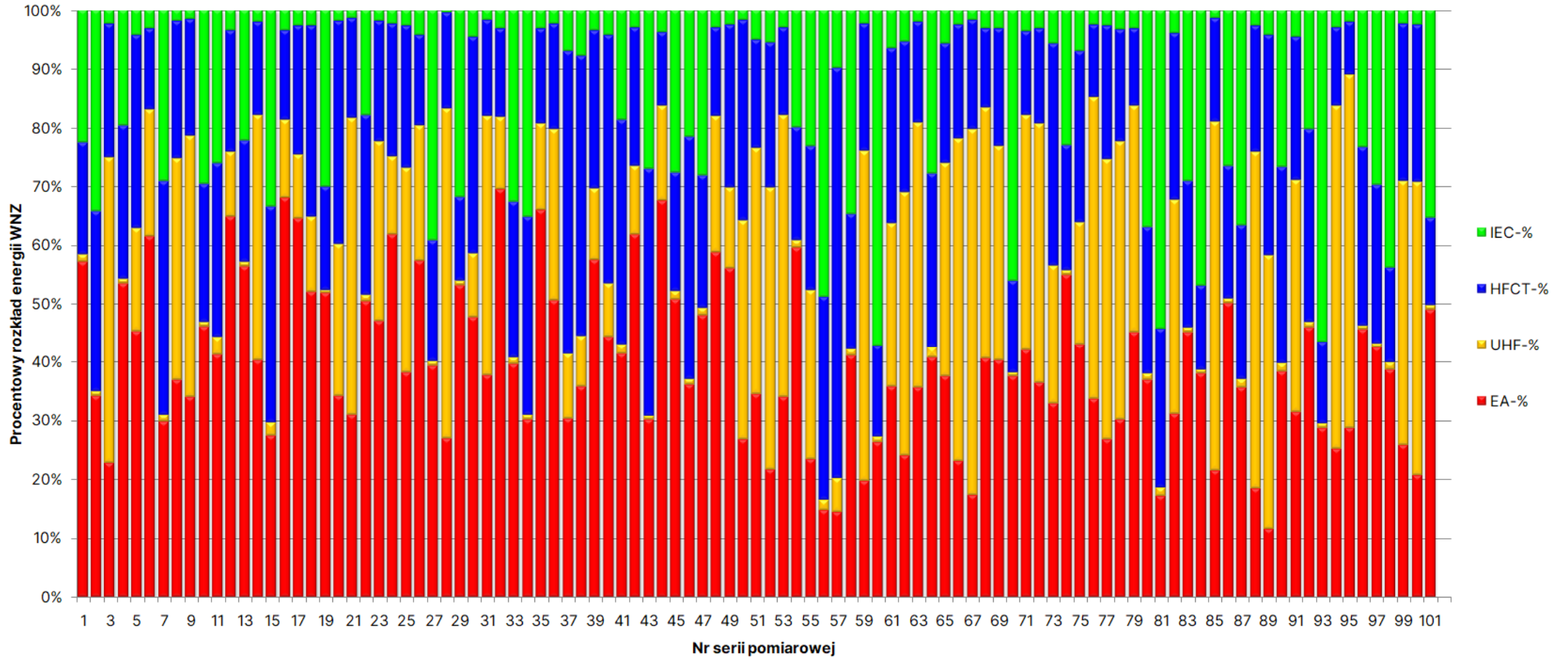


Układ pomiarowy do badania rozkładu energii impulsów WNZ rejestrowanych metodą IEC 60270, HF, UHF i EA



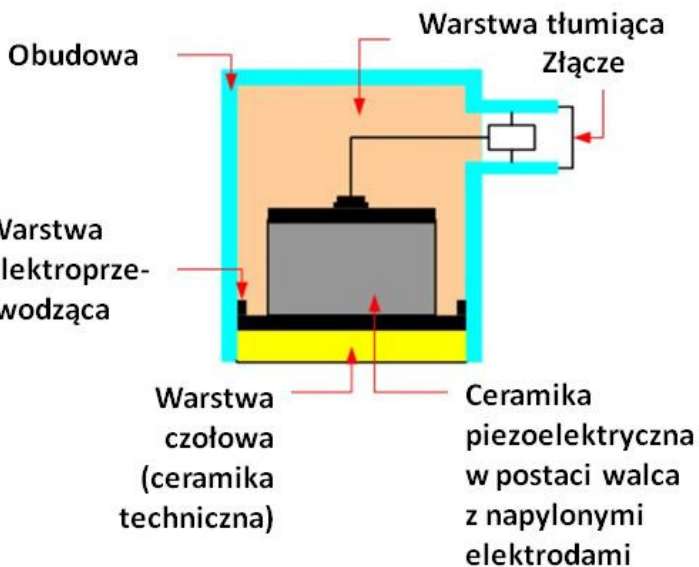


Znormalizowany procentowy rozkład energii impulsów WNZ generowanych w układzie ostrze- płyta w oleju



Metoda emisji akustycznej – system pomiarowy

1. Przetwornik piezoelektryczny



2. Przedwzmacniacz/filtr



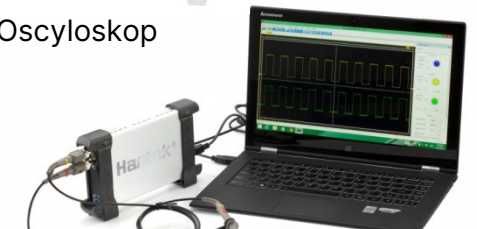
3. Układ akwizycji sygnałów



System wielokanałowy



Oscyloskop



Przystawka oscyloskopowa

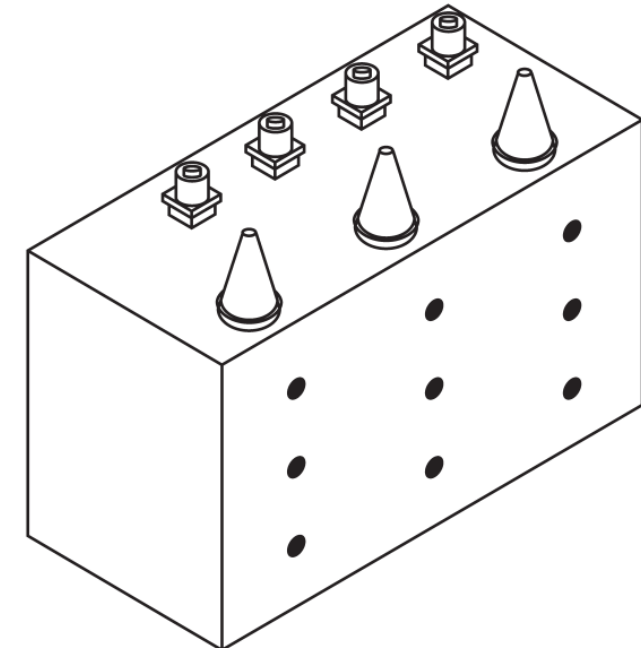
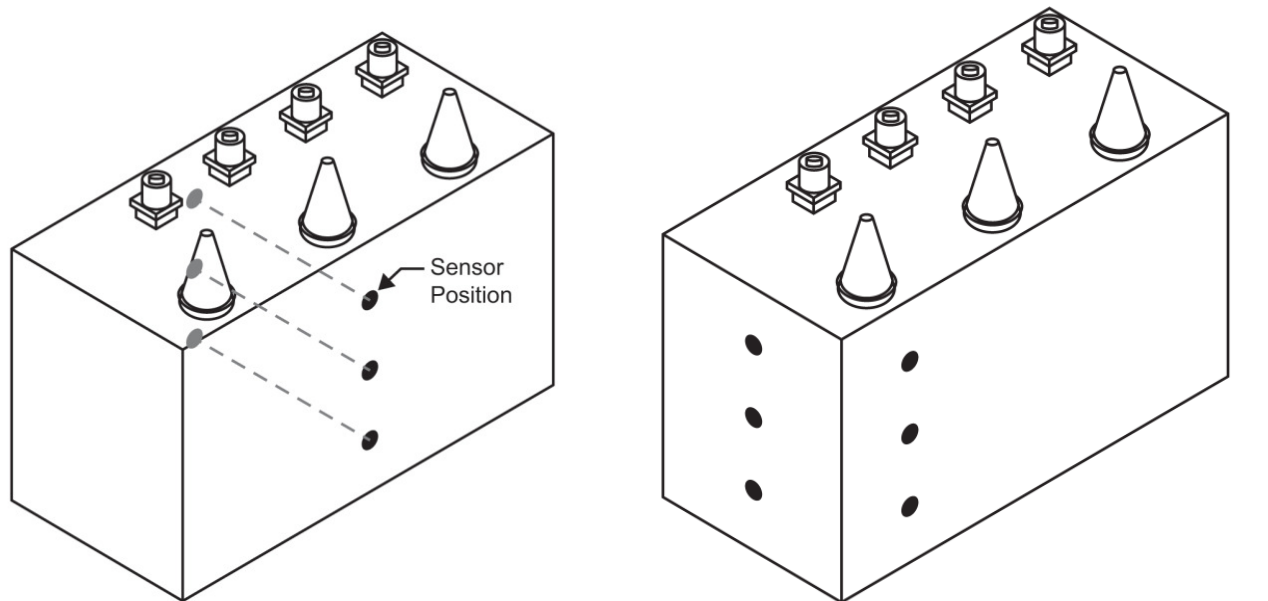


Jednokanałowy system podręczny



System monitoringu

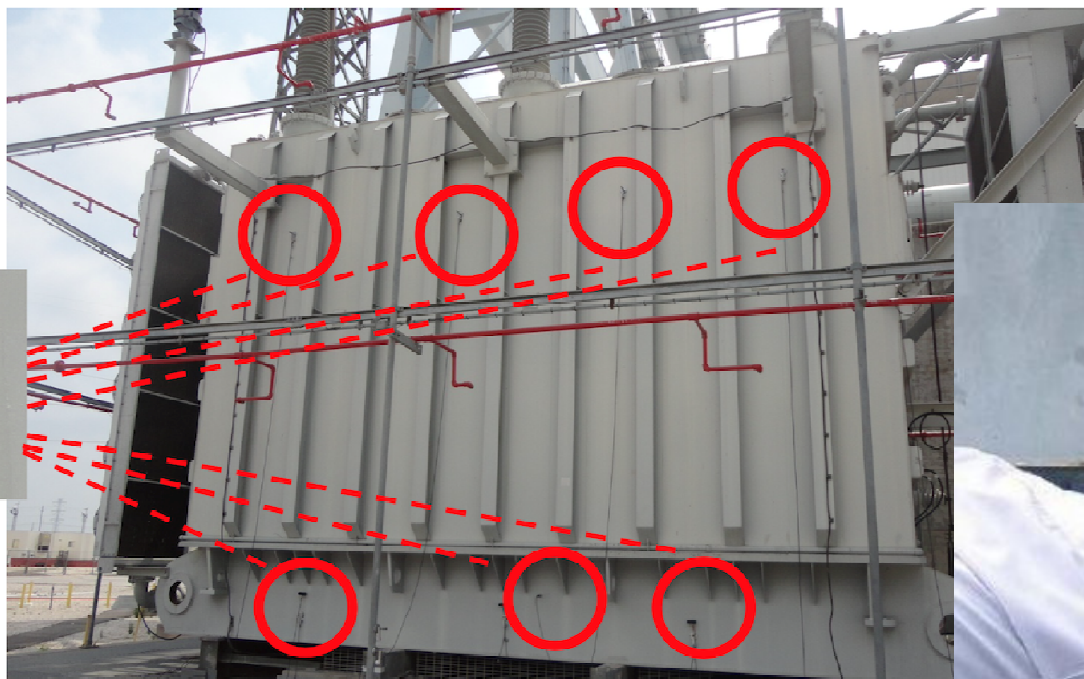
Metoda emisji akustycznej – rozmieszczenie przetworników



Sugerowany sposób rozmieszczenia przetworników, gdy znana jest faza, w której występują WNZ

Sugerowany sposób rozmieszczenia przetworników, gdy faza, w której występują WNZ jest nieznana

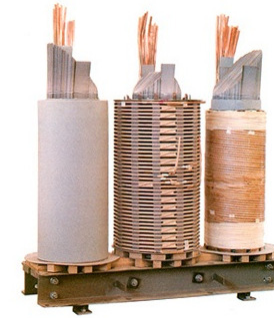
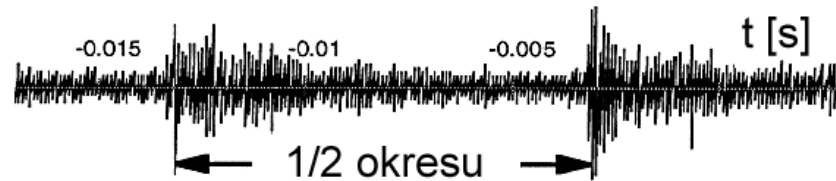
Metoda emisji akustycznej – instalowanie przetworników na kadzi transformatora



Metoda emisji akustycznej – źródła zakłóceń

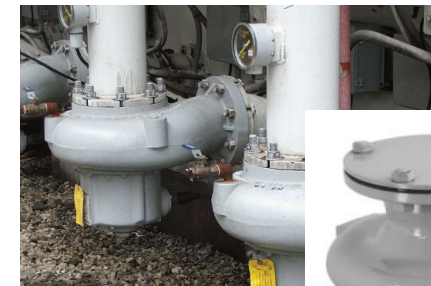
> Drgania magnetostrykcyjne rdzenia (szum Barkhausena):

- główna częstotliwość równa jest podwojonej częstotliwości U zasilania
- amplituda sygnału w każdym półokresie napięcia ma podobną wartość
- niektóre harmoniczne mogą mieć częstotliwość nawet **30-40 kHz**



> Pompy olejowe:

- sygnały akustyczne pochodzące od pomp olejowych mogą interferować z sygnałami EA od wnz, które rejestrowane są przetwornikiem umieszczonym zbyt nisko na kadzi
- nie wykazują żadnej korelacji z ch-ką napięcia zasilającego



Metoda emisji akustycznej – źródła zakłóceń

- > **Operacja przełączania zacze­pów:**
 - sygnały EA o różnych częstotliwościach i dużej energii



- > **Wentylatory:**
 - mogą generować sygnały EA podobne do wnz



- > **Wyładowania atmosferyczne, deszcz, wiatr, grad mogą aktywować przetwornik EA.:**
 - przypadkowe sygnały o czasie trwania powyżej 1 ms





Metoda emisji akustycznej – zalety i wady

Zalety:

- > Pomiar nie wymaga wyłączenia badanej jednostki
- > Możliwość detekcji, lokalizacji czy dłuższego monitorowania wyładowań niezupełnych
- > Duża odporność na zakłócenia elektromagnetyczne

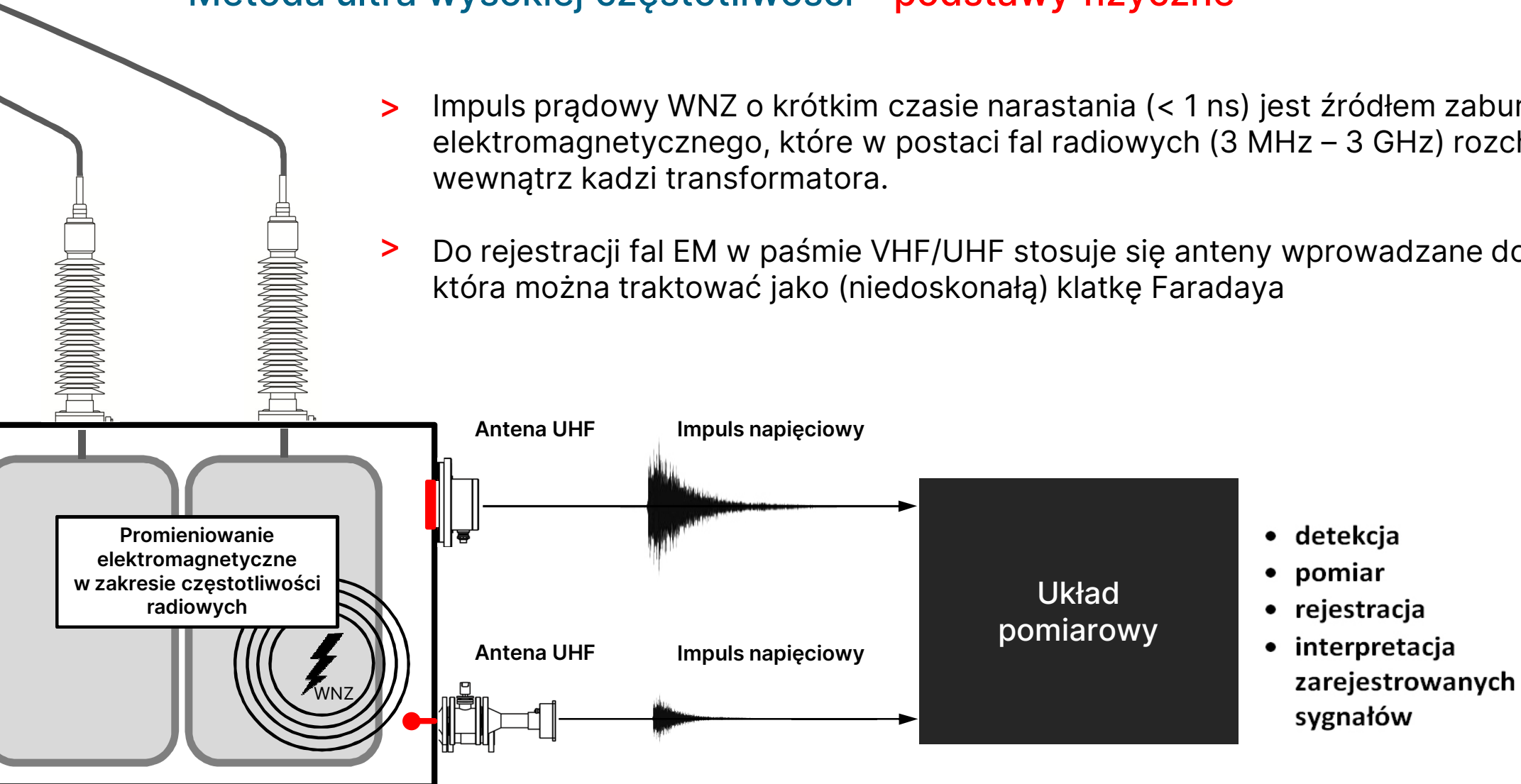
Wady:

- > Brak możliwości oszacowania energii WNZ
- > Trudno wykrywane są WNZ o małej energii (<300 pC)
- > Z powodu tłumienia, praktycznie niemożliwe jest wykrycie i zlokalizowanie wyładowań wewnątrz uzwojeń
- > Nieodporna na niektóre zakłócenia akustyczne (operacje przetwornika zaczepów, intensywne zjawiska atmosferyczne)
- > Wymaga dużego doświadczenia od diagnosty

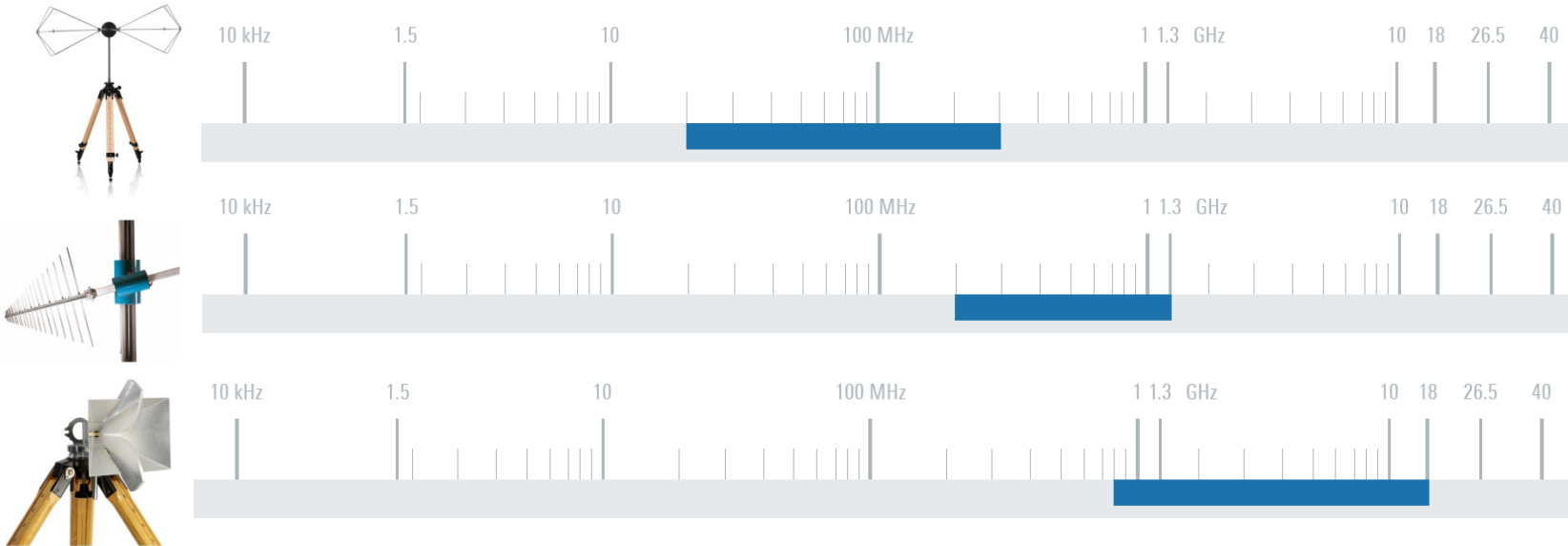
>>> Metoda ultra wysokiej częstotliwości (UHF)<<<

Metoda ultra wysokiej częstotliwości – podstawy fizyczne

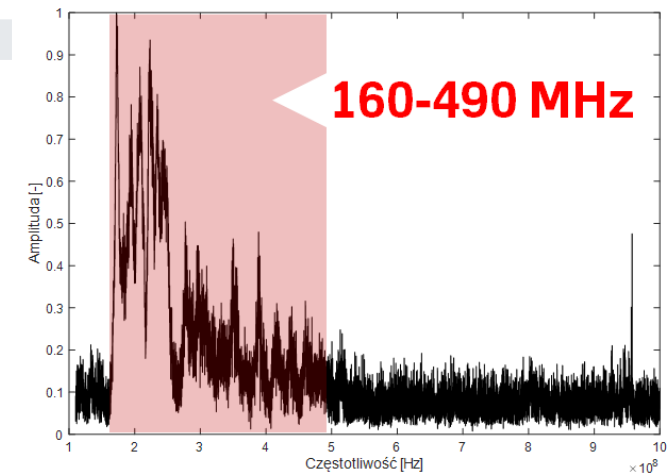
- > Impuls prądowy WNZ o krótkim czasie narastania (< 1 ns) jest źródłem zaburzenia pola elektromagnetycznego, które w postaci fal radiowych (3 MHz – 3 GHz) rozchodzi się wewnątrz kadzi transformatora.
- > Do rejestracji fal EM w paśmie VHF/UHF stosuje się anteny wprowadzane do kadzi, która można traktować jako (niedoskonałą) klatkę Faradaya



Metoda ultra wysokiej częstotliwości – podstawy fizyczne



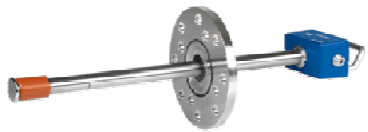
- > Badania laboratoryjne wykonane przy użyciu trzech szerokopasmowych anten (łącznie pokrywały pasmo od 20 MHz do 18 GHz) wykazały, że WNZ typowe dla izolacji papierowo-olejowej (ślizgowe, powierzchniowe, klin olejowy, ostrze w oleju, pęcherzyki gazowe w oleju) generują impulsy elektromagnetyczne o częstotliwościach w zakresie od **ok. 160 MHz** do **ok. 490 MHz**.



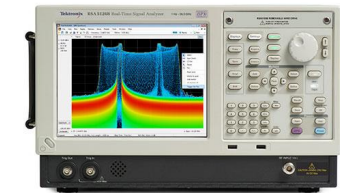
Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

3. Układ akwizycji sygnałów

1. Antena



2. Układ kondycjonujący sygnały



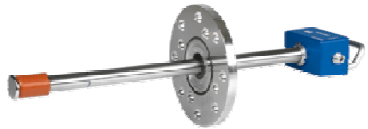
Szerokopasmowy oscyloskop
lub analizator widma



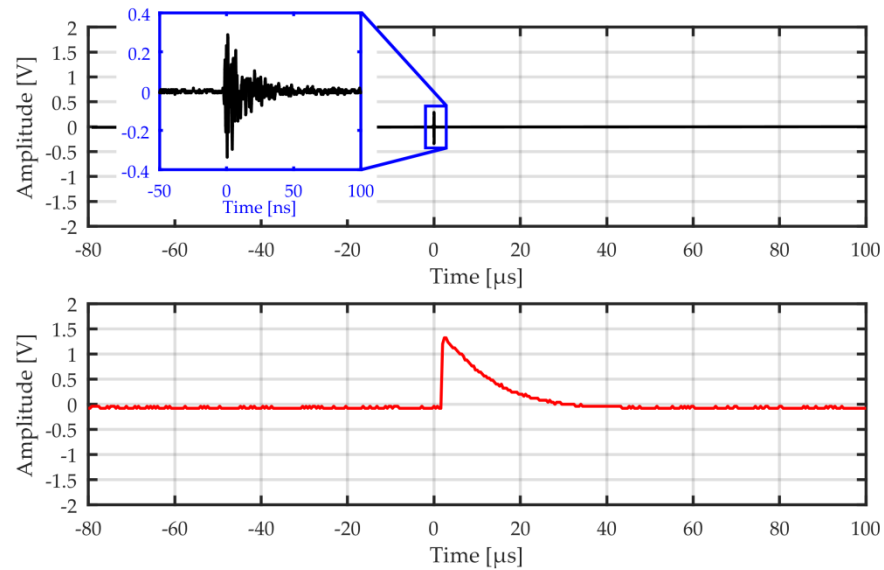
Dedykowane, komercyjne układy
pomiarowe

Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

1. Antena



2. Układ kondycjonujący sygnały z *peak detektorem*



3. Układ akwizycji sygnałów



Standardowy oscyloskop

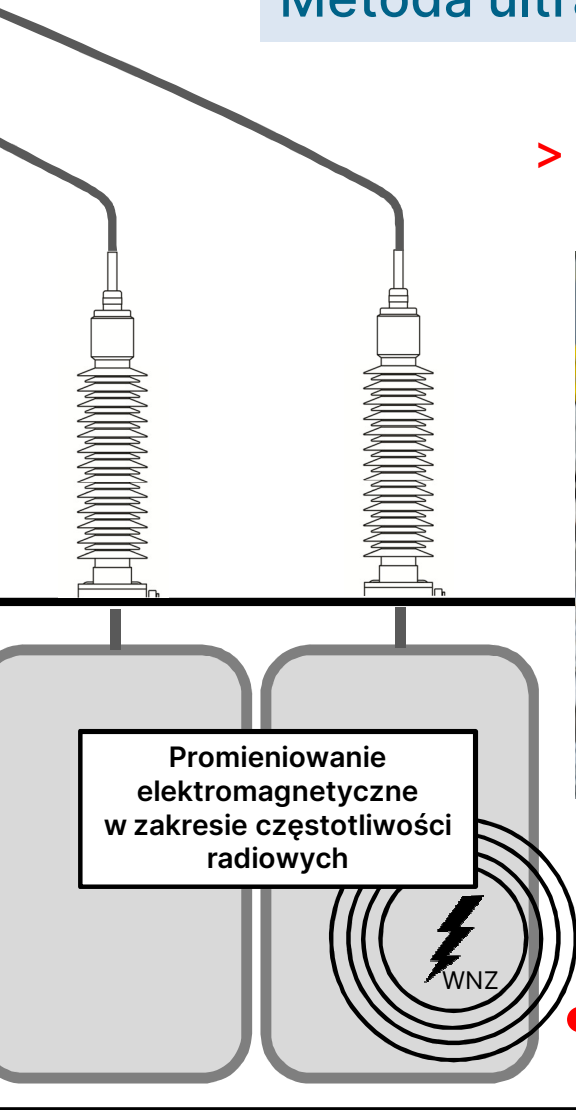


Karty DAQ i rejestratory sygnałów

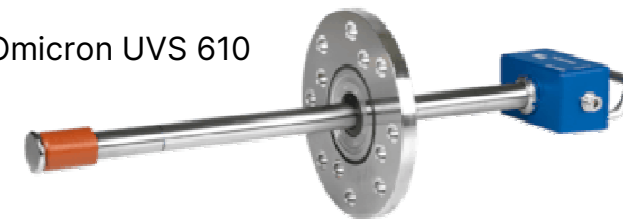
Efekt działania detektora wartości szczytowej / obwiedni (peak detector/envelope detector)

Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

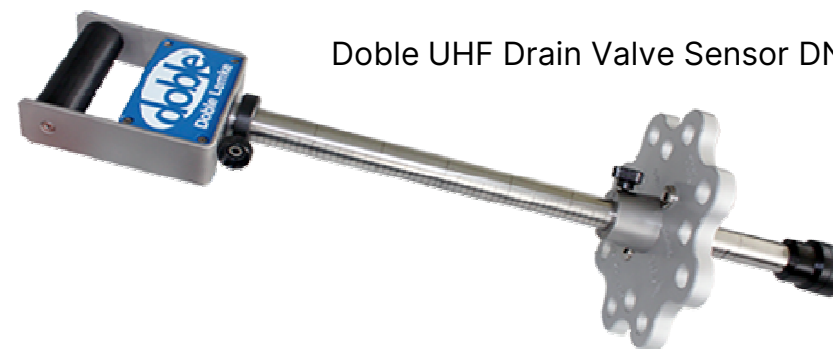
> Antena instalowana w zaworze olejowym



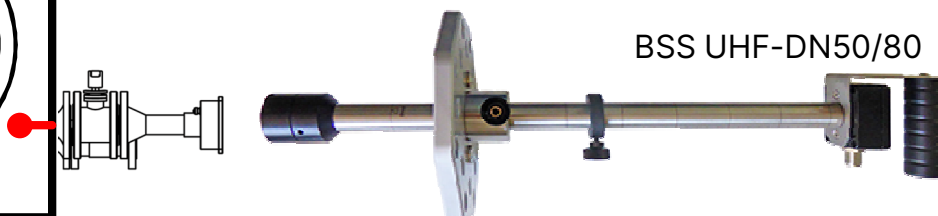
Omicron UVS 610



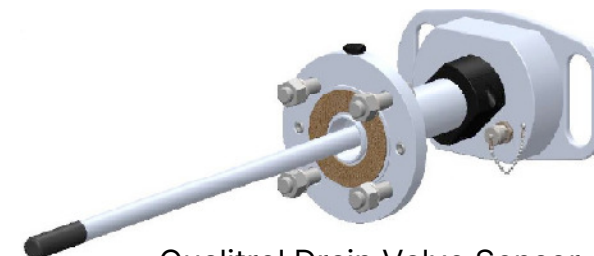
Doble UHF Drain Valve Sensor DN50/DN80



BSS UHF-DN50/80

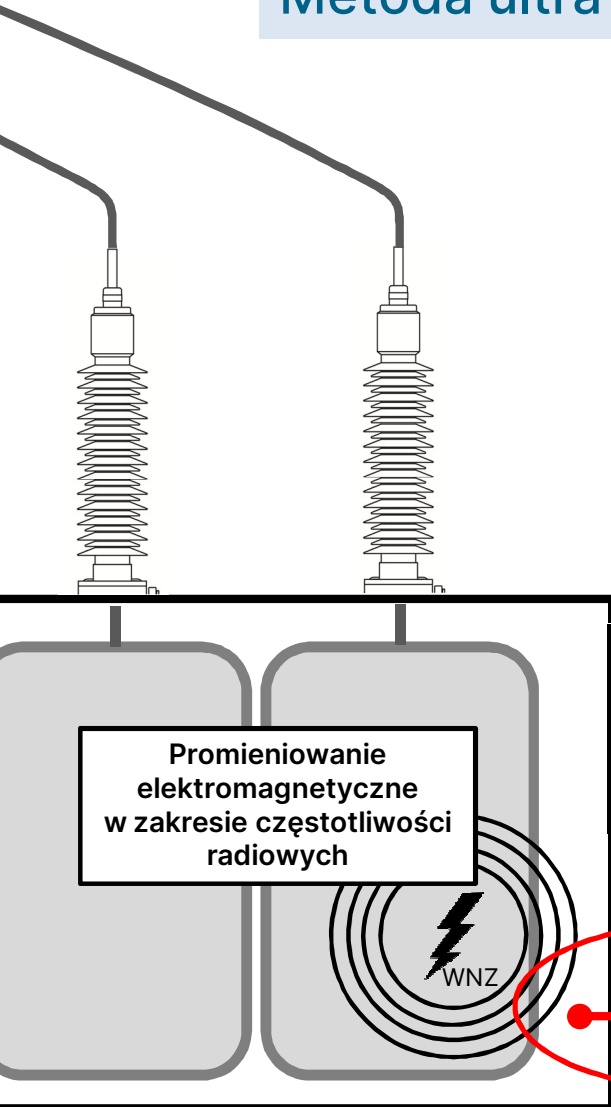
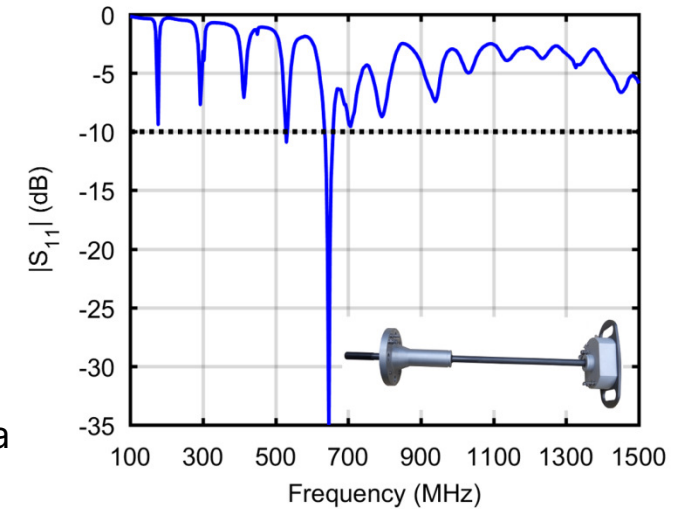


Qualitrol Drain Valve Sensor



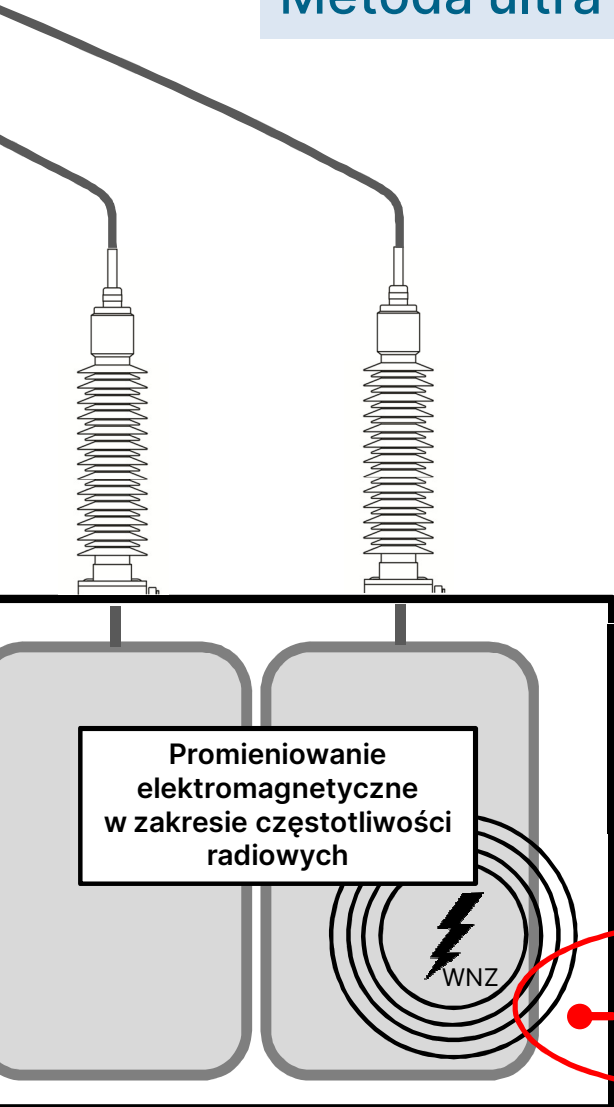
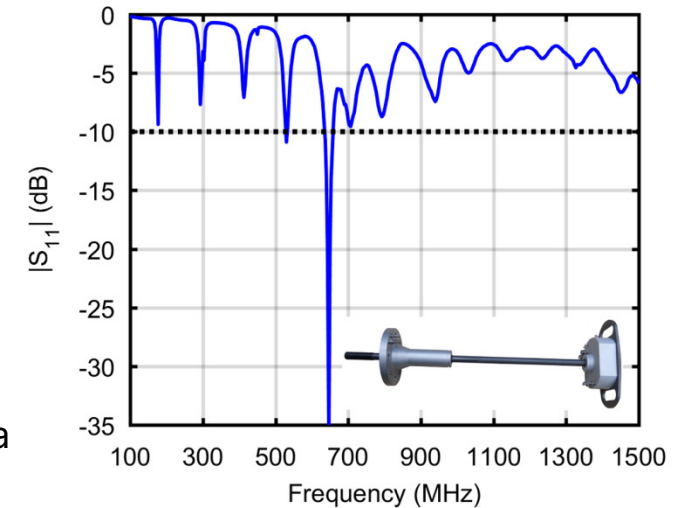
Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

- > Anteny instalowane w zaworze olejowym to najczęściej proste anteny unipolarne (prętowe) lub prętowe z końcówką uformowaną w kształcie mini-dysku lub stożka.
- > Niska czułość detekcji WNZ wynikająca z położenia w kadzi i konstrukcji anteny oraz jej wąskopasmowej charakterystyki przenoszenia.
- > Instalacja anteny nie wymaga wyłączenia transformatora

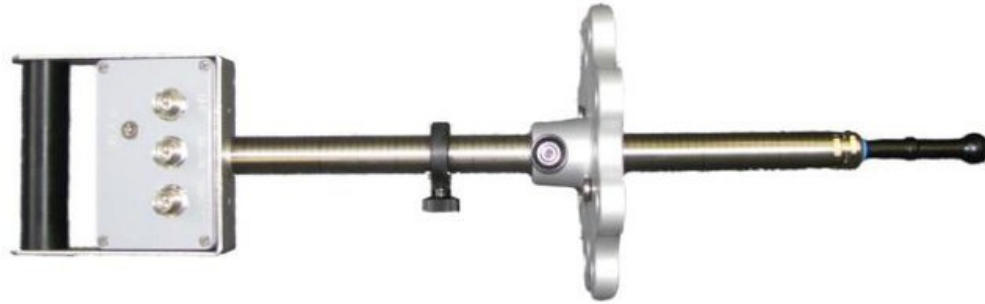


Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

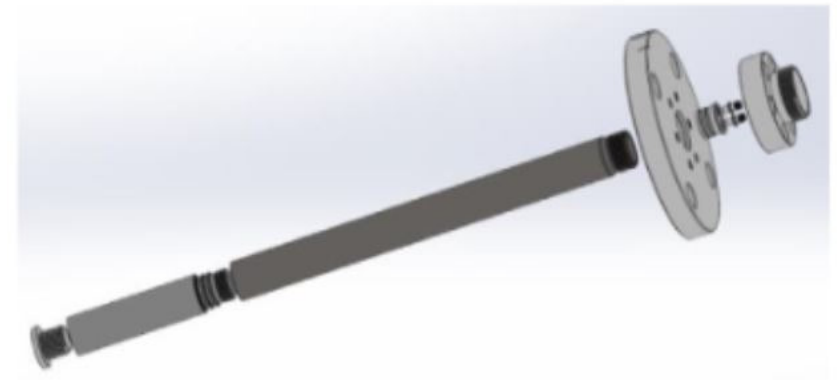
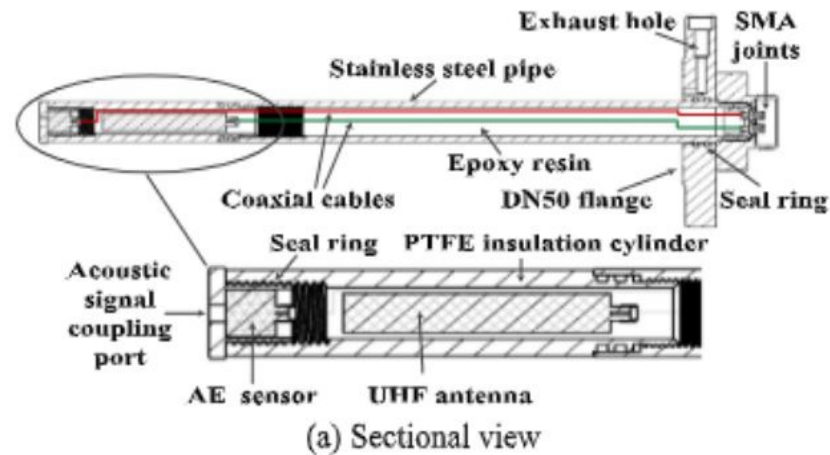
- > Anteny instalowane w zaworze olejowym to najczęściej proste anteny unipolarne (prętowe) lub prętowe z końcówką uformowaną w kształcie mini-dysku lub stożka.
- > Niska czułość detekcji WNZ wynikająca z położenia w kadzi i konstrukcji anteny oraz jej wąskopasmowej charakterystyki przenoszenia.
- > Instalacja anteny nie wymaga wyłączenia transformatora
- > Konstrukcja niektórych typów zaworów olejowych uniemożliwia wprowadzenie anteny do kadzi



Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy



Bettle, M., M. Siegel, and S. Tenbohlen. "Investigations of in-oil methods for PD detection and vibration measurement." Proceedings of the International Symposium on High voltage Engineering (ISH), Seoul, Korea. 2013.

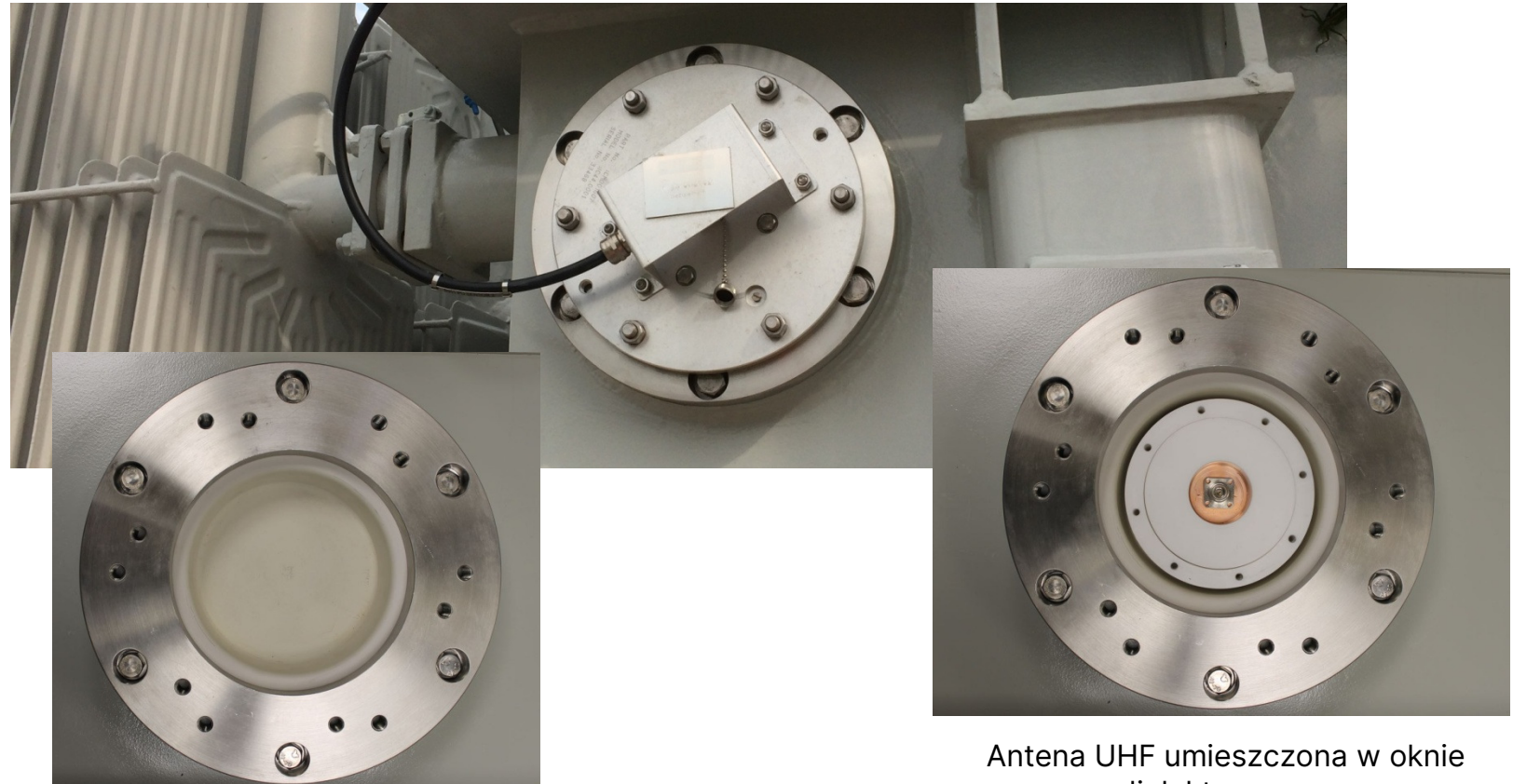
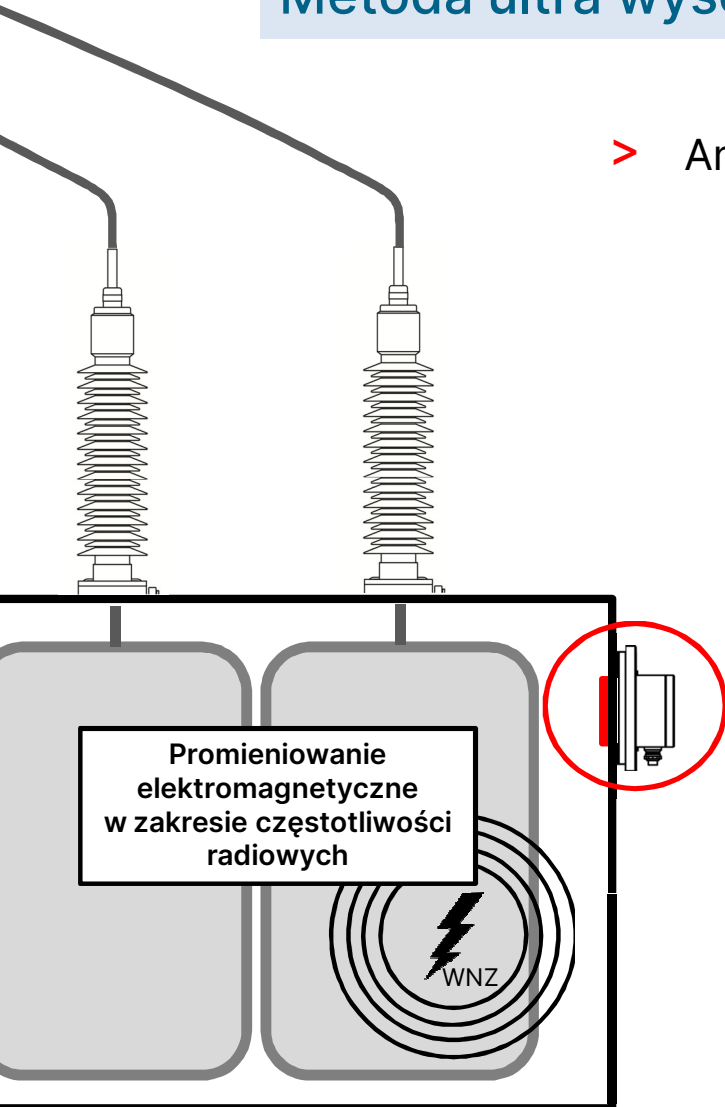


(b) Integral assembly drawing in 3D

Si, Wenrong, et al. "Combined in-oil PD sensor with AE and UHF methods for PD detection in transformer." *Energy Reports* 8 (2022): 177-191.

Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

- > Antena instalowana w oknie dielektrycznym



Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

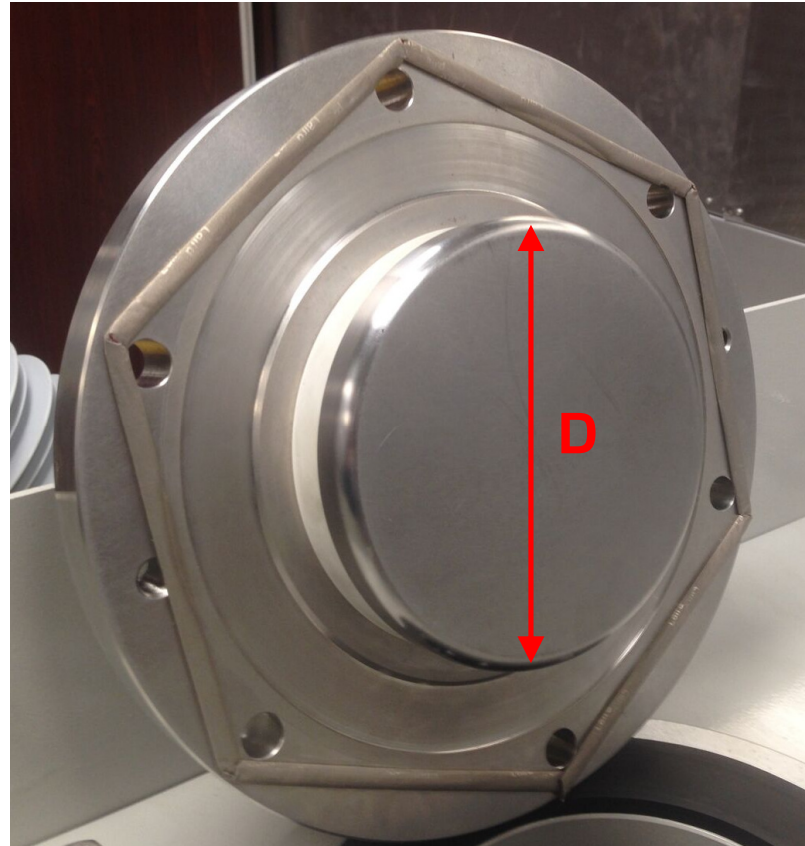
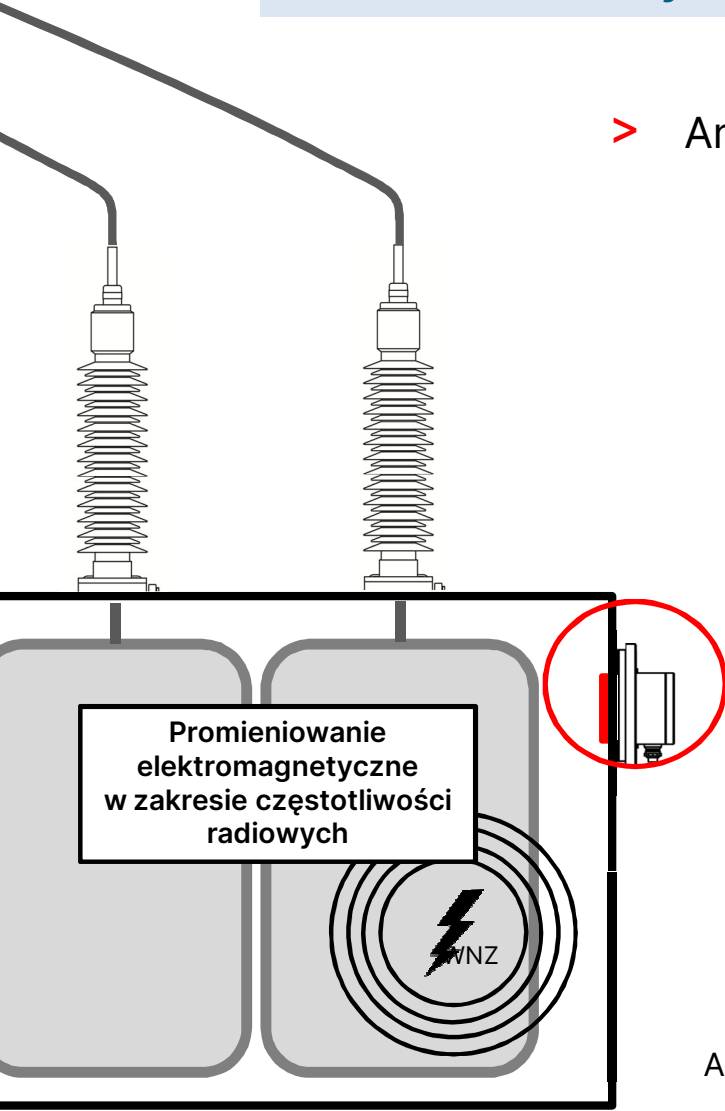
Wytyczne PSE dot. nowych transformatorów:

- > monitorowanie wnz w trybie on-line przy użyciu anten UHF wprowadzanych do transformatora przy użyciu co najmniej **dwóch specjalnych „okien” dielektrycznych** umiejscowionych na kadzi
- > możliwe jest wykorzystanie w tym celu **otworów rewizyjnych**, zakrywanych pokrywami z materiału dielektrycznego
- > włazy mają mieć wymiar 660x660 mm lub śr. 660 mm celem umożliwienia łatwego dostępu do PPZ. Otwory rewizyjne mają mieć wymiar **300x600 mm** lub **średnicę 400 mm**
- > przyjęte rozwiązanie, typ użytych sond UHF, rozmiary okien/pokryw oraz ich materiał są przedmiotem **uzgodnień technicznych** w ramach przeglądu projektu autotransformatora



Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

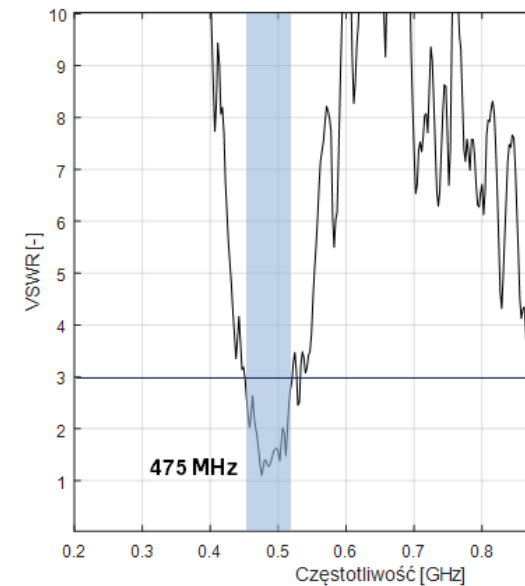
- > Antena instalowana w oknie dielektrycznym



Antena dyskowa z wbudowanym oknem dielektrycznym; $D = 15 \text{ cm}$

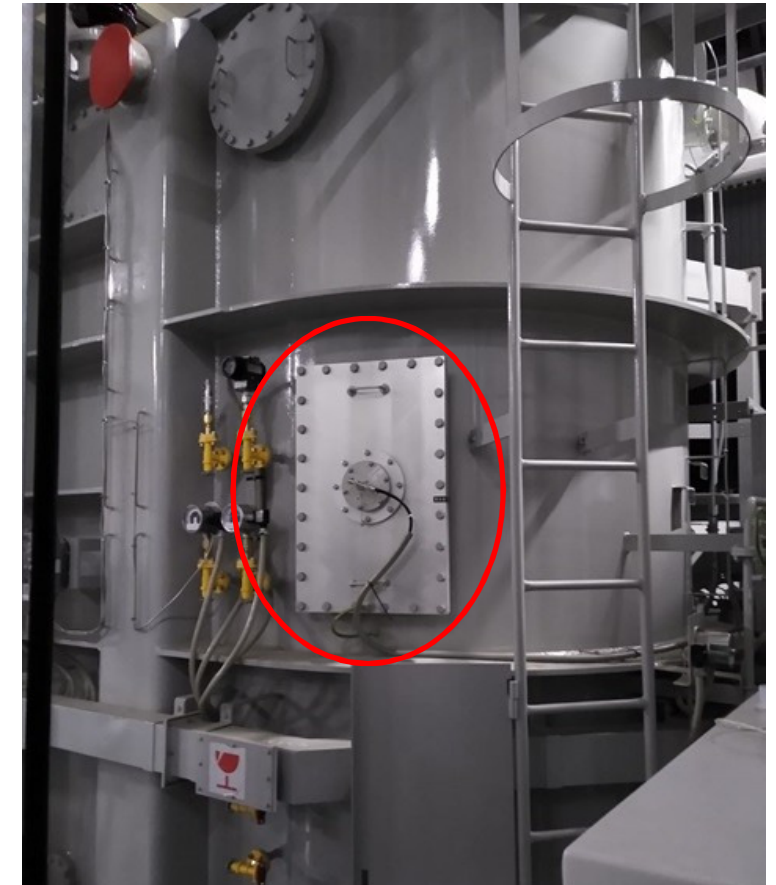
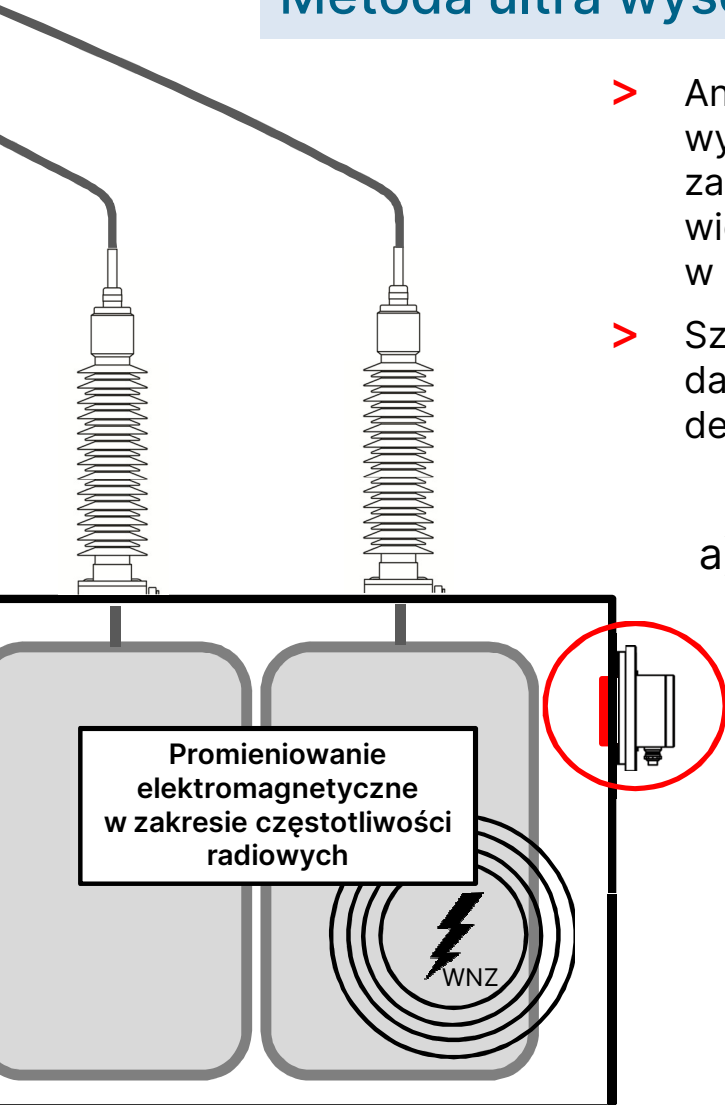
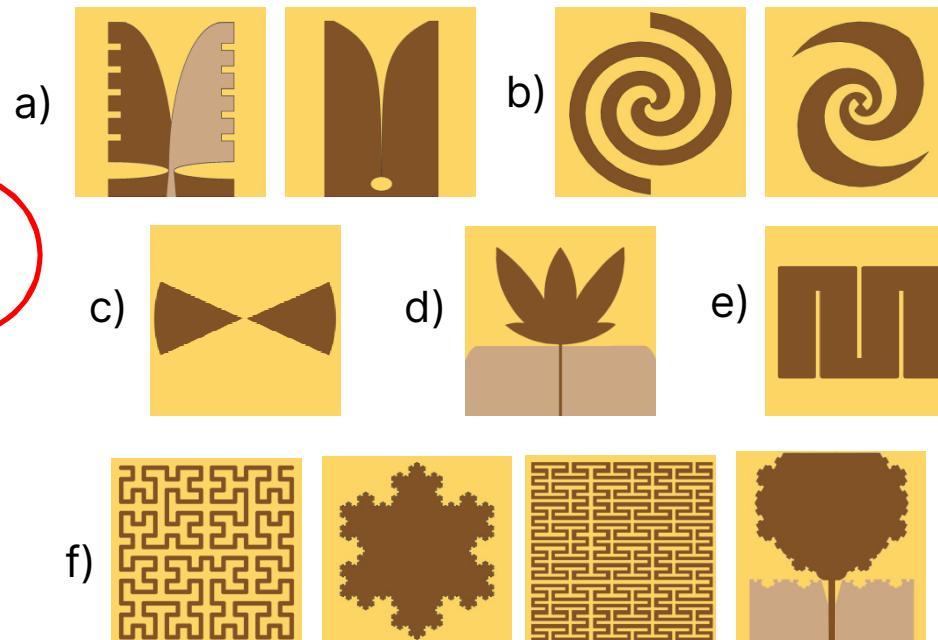
$$D = \lambda/4$$

D [cm]	f [MHz]
7,1	1000
14,3	500
35,7	200



Metoda ultra wysokiej częstotliwości – system pomiarowy

- > Anteny instalowane w oknach dielektrycznym mają wyższą czułość detekcji od anten instalowanych w zaworze spustowym (większa apertura anteny to większy zysk energetyczny; korzystniejsze położenie w kadzi transformatora)
- > Szeroki wybór konstrukcji anten mikropaskowych dający możliwość uzyskania wysokiej efektywności w detekcji WNZ, m.in.:

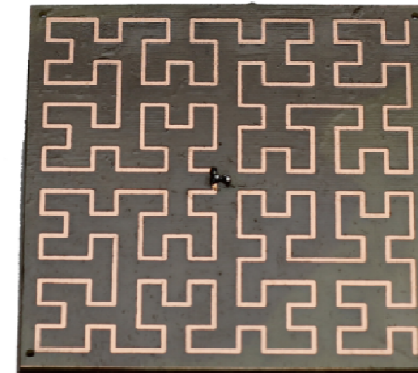
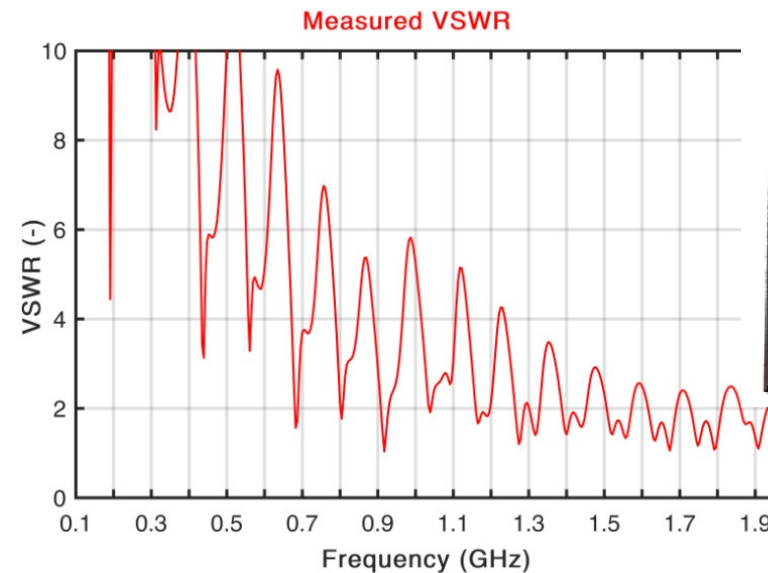
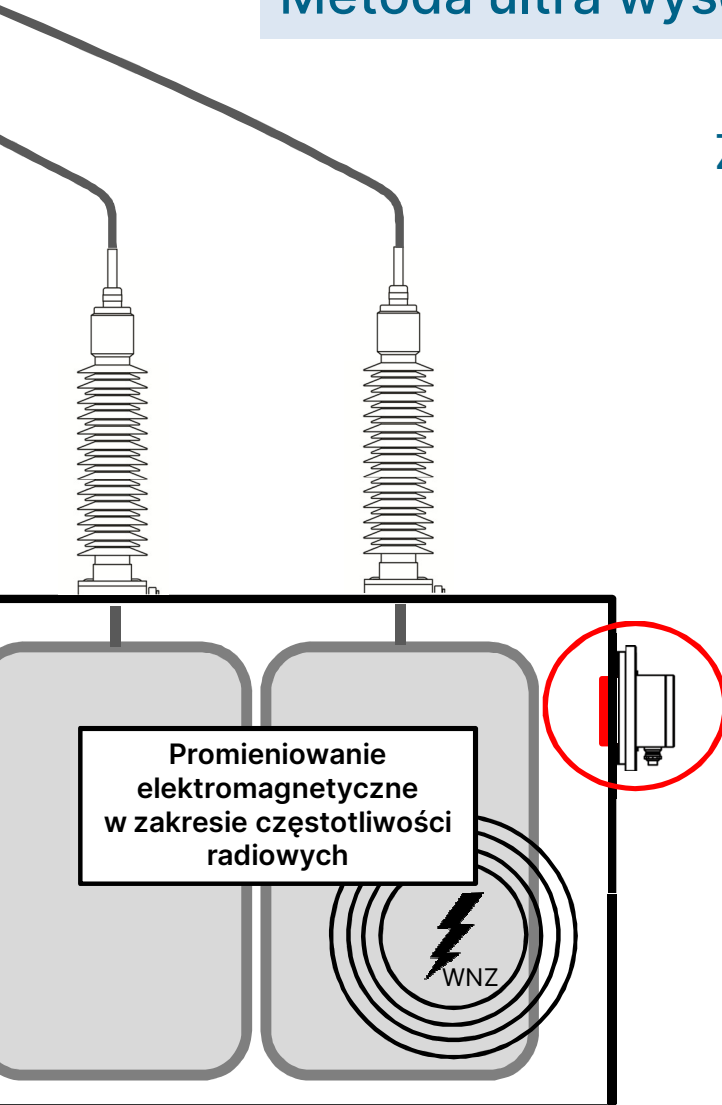


a) anteny Vivaldiego, b) anteny spiralne, c) antena typu muszka (bow-tie), d) antena inspirowana przyrodą (bio-inspired antenna), e) antena meandrowana f) anteny fraktalne

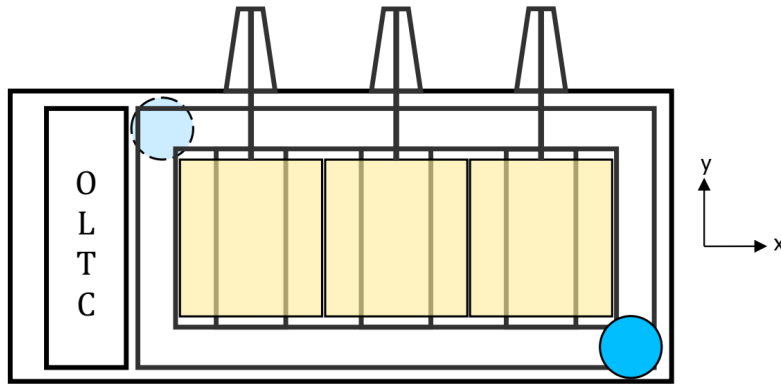
Metoda ultra wysokiej częstotliwości – **system pomiarowy**

Zalety i wady anten mikropaskowych:

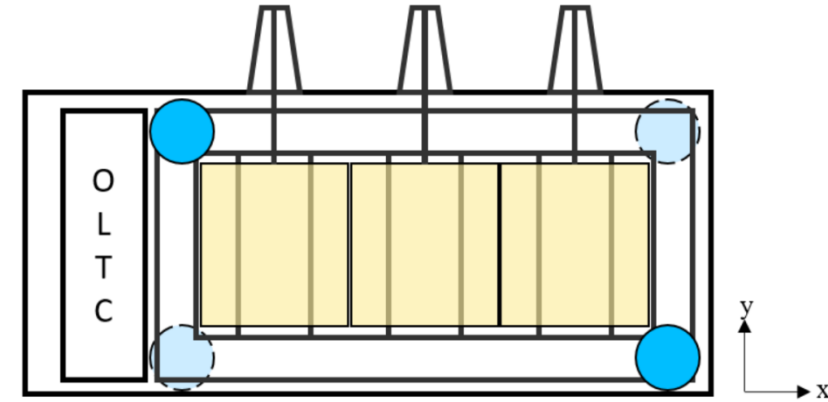
- > wielorezonansowa, „szerokopasmowa” charakterystyka przenoszenia
- > miniaturyzacja rozmiarów anteny przy utrzymaniu wysokiej sprawności
- > łatwość wykonania w technice PCB
- > niższy zysk energetyczny w porównaniu do anteny dyskowej



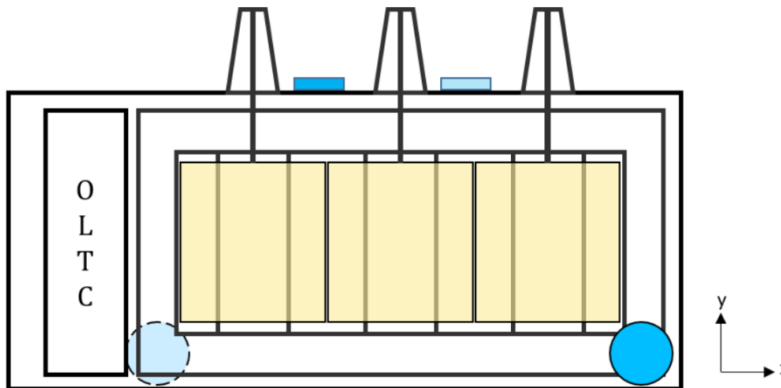
Metoda ultra wysokiej częstotliwości – rozmieszczenie anten



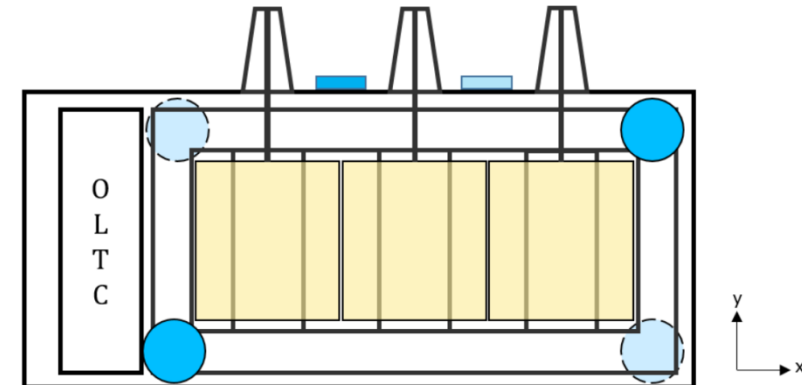
Sugerowany sposób rozmieszczenia **2** anten do **detekcji WNZ**



Sugerowany sposób rozmieszczenia **4** anten do **lokalizacji WNZ**



Sugerowany sposób rozmieszczenia **4** anten z wykorzystaniem górnej pokrywy kadzi do **lokalizacji WNZ**

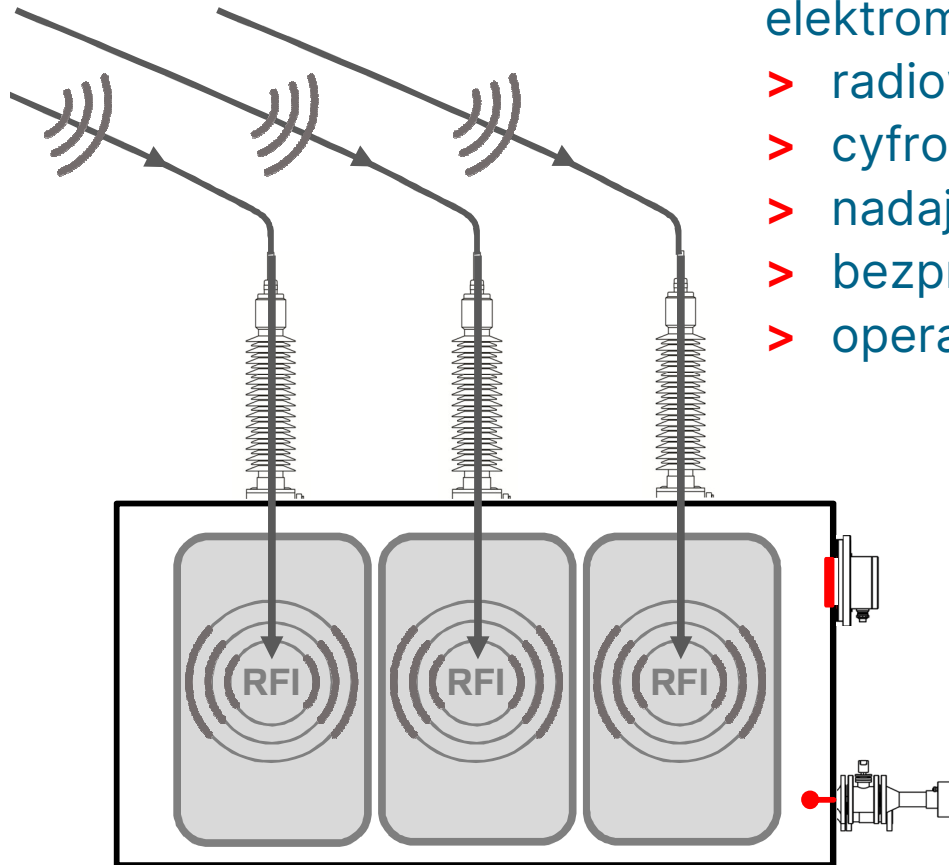


Sugerowany sposób rozmieszczenia **6** anten z wykorzystaniem górnej pokrywy kadzi do **lokalizacji WNZ**

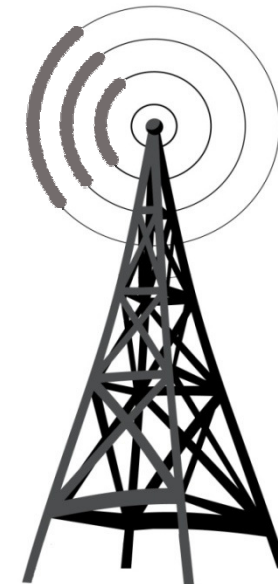
Metoda ultra wysokiej częstotliwości – źródła zakłóceń

Główne źródła zakłóceń / interferencji elektromagnetycznych w metodzie UHF:

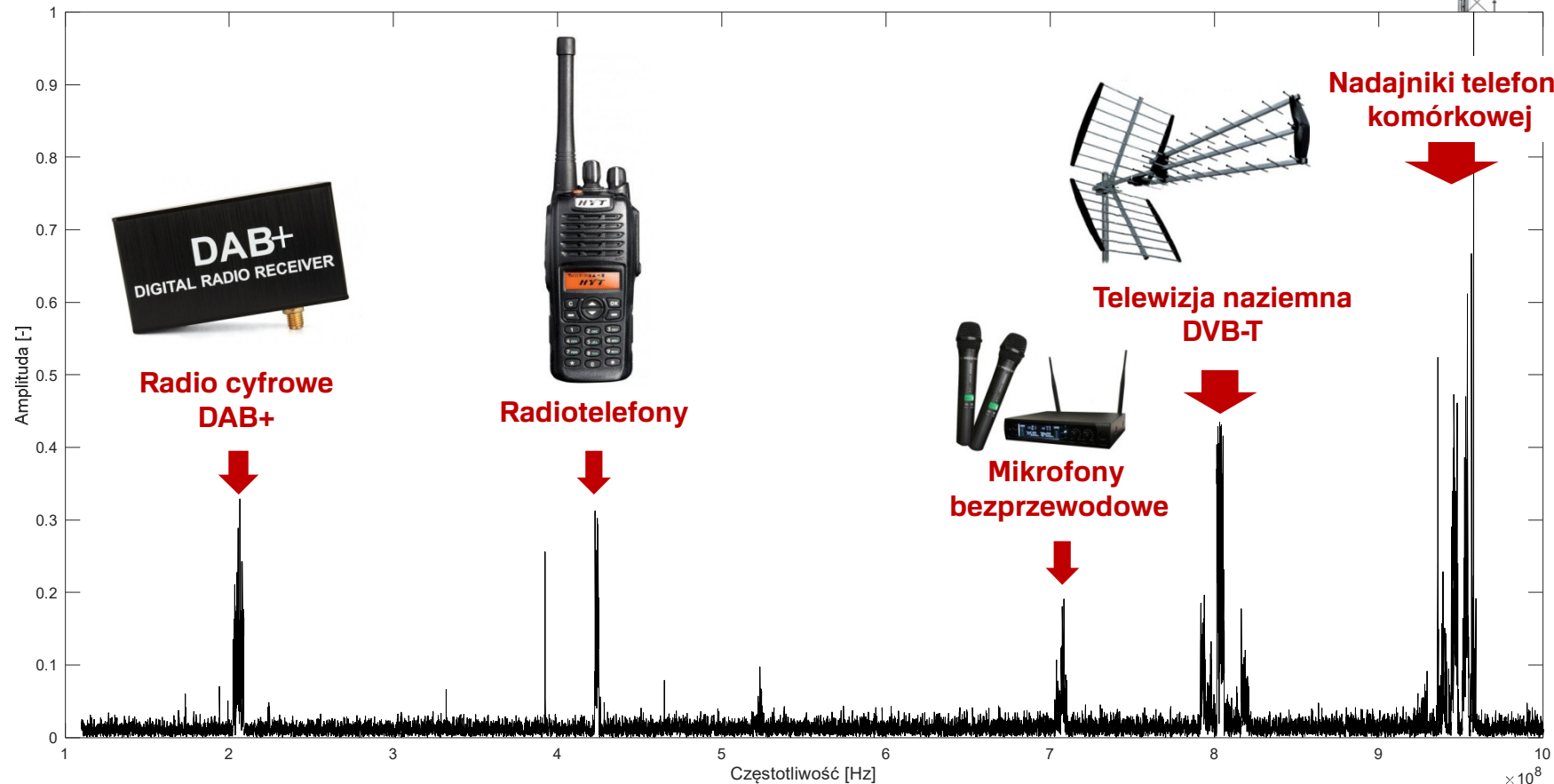
- > radiowe stacje nadawcze
- > cyfrowa telewizja naziemna DVB-T
- > nadajniki telefonii komórkowej
- > bezprzewodowy Internet LTE
- > operacje łączeniowe na stacji el-en



Zakłócenia / interferencje elektromagnetyczne (RFI)



Metoda ultra wysokiej częstotliwości – źródła zakłóceń



Widmo tła radiowego zmierzone w nieekranowanym pomieszeniu laboratoryjnym



Metoda ultra wysokiej częstotliwości – zalety i wady

Zalety:

- > Większa odporność na zakłócenia EM od metody konwencjonalnej IEC 60270
- > Możliwość detekcji, lokalizacji czy dłuższego monitorowania wyładowań niezupełnych
- > Instalacja anteny w zaworze olejowym nie wymaga wyłączenia transformatora

Wady:

- > Wysoka cena systemu pomiarowego
- > Instalacja i uruchomienie systemu w miejscu zainstalowania transformatora to duże wyzwanie logistyczne i techniczne (spuszczenie oleju poniżej poziomu okna dielektrycznego, konieczność idealnego dopasowania mechaniki anten/okien/uszczerek z włazem rewizyjnym, poinstalacyjne badania diagnostyczne itd.)
- > Brak możliwości oszacowania energii WNZ

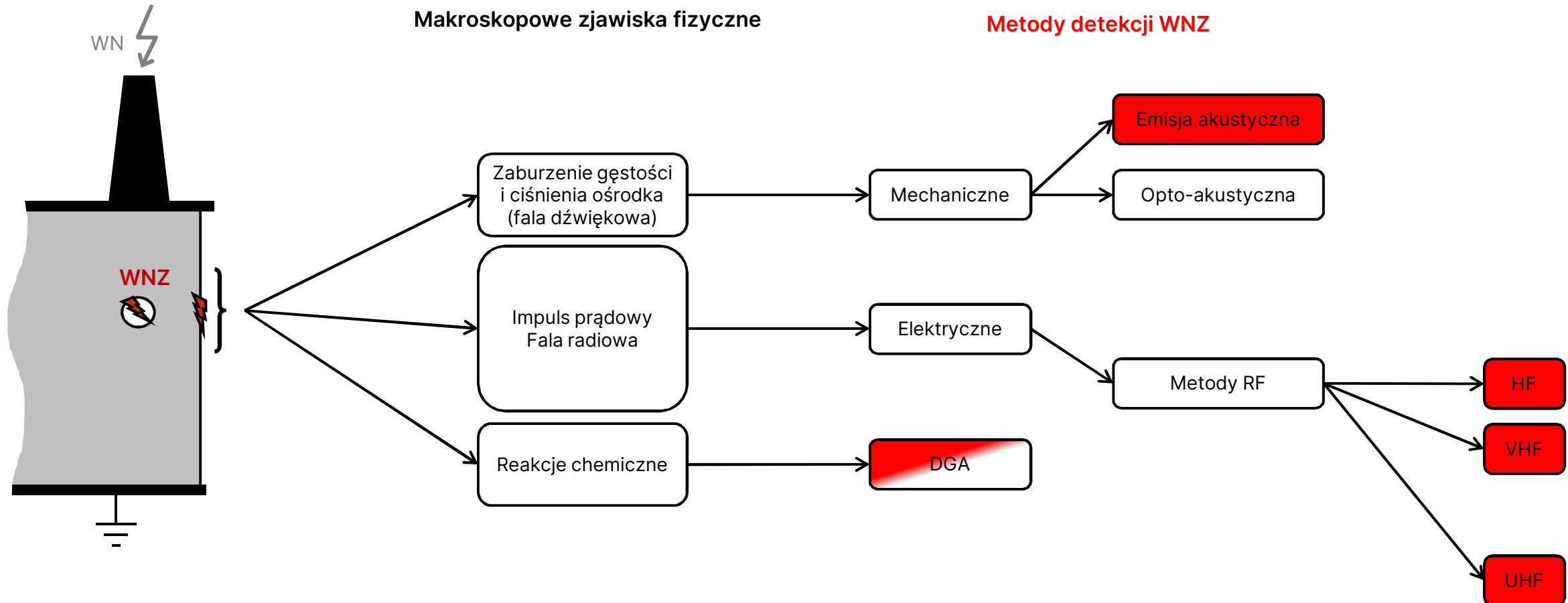
MONITORING ON-LINE WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W TRANSFORMATORACH ENERGETYCZNYCH



Monitoring on-line WNZ – zalety

- > Przewaga monitoringu nad badaniami okresowymi polega na możliwości **natychmiastowego wykrycia zapłonu WNZ** czy wzrostu ich intensywności, a tym samym pozwala służbom eksploatacyjnym odpowiednio szybko opracować i wdrożyć procedury minimalizujące ryzyko awarii.
- > Na podstawie zebranych przez system monitoringu danych można dynamicznie **kształtować wymagania w zakresie okresowych badań diagnostycznych** (np. ich przyspieszenie lub odroczenie) oraz zdecydować, czy i kiedy konieczne jest zaplanowanie przestojów i wykonanie konserwacji.
- > Niektóre systemy monitorowania wyładowań niezupełnych online zazwyczaj umożliwiają wymianę danych ze stacyjnym systemem SCADA. Umożliwia to implementację zaawansowanych reguł wnioskowania opartych na metodach statystycznych lub uczenia maszynowego, które pozwalają na **wykrycie zależności między aktywnością WNZ a parametrami takimi jak napięcie, obciążenie, temperatura oleju, położenie zaczełu podobciążeniowego przełącznika zaczełów czy ilość gazów rozpuszczonych w oleju.**

Metody monitorowania online WNZ w transformatorach



Monitoring on-line WNZ – DGA online?

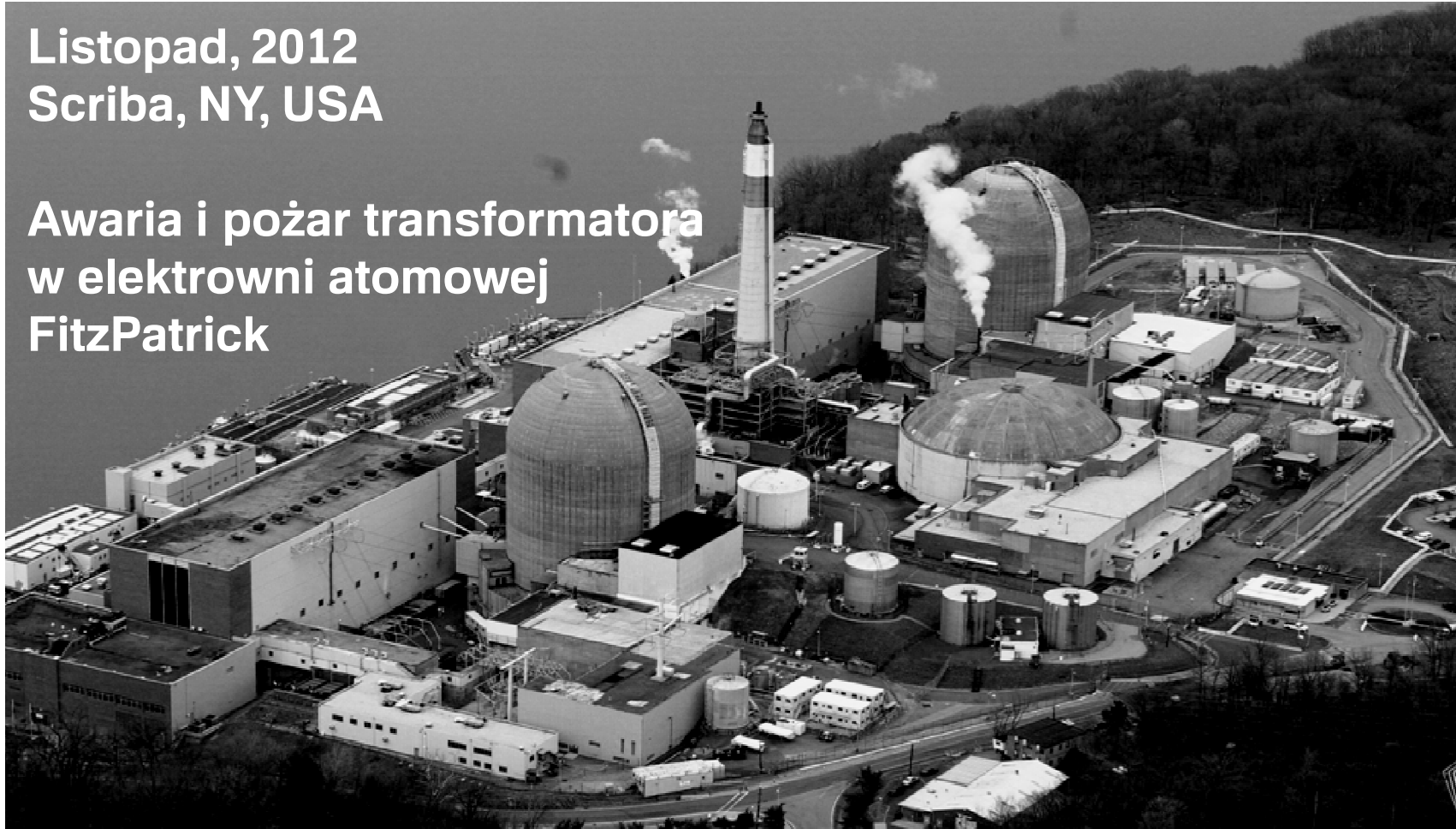


- > pomiar i analiza wykonywane są zwykle w długich odstępach czasu (co godzinę lub rzadziej)
- > długi czas potrzebny na wykrycie wnz
- > problemy eksploatacyjne
- > awarie transformatorów z zainstalowanym systemem DGA

Monitoring on-line WNZ – DGA online?

Listopad, 2012
Scriba, NY, USA

Awaria i pożar transformatora
w elektrowni atomowej
FitzPatrick

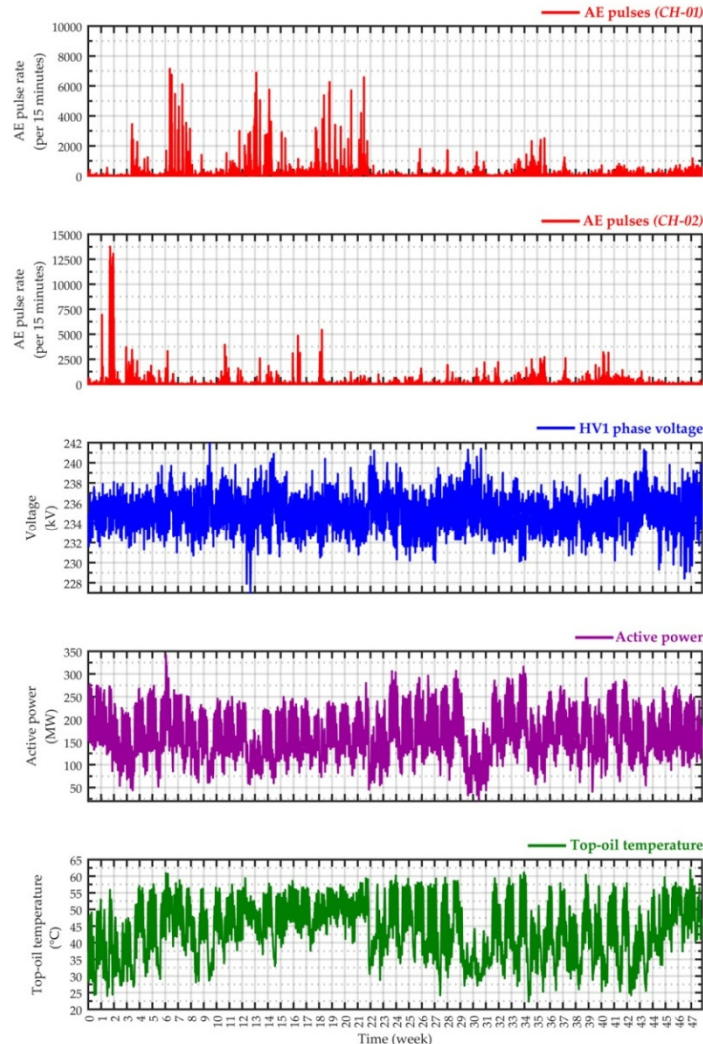


“All test results and monitoring data prior to the transformer failure indicated it was operating appropriately. There was **nothing observed** that would indicate the transformer would fail.”

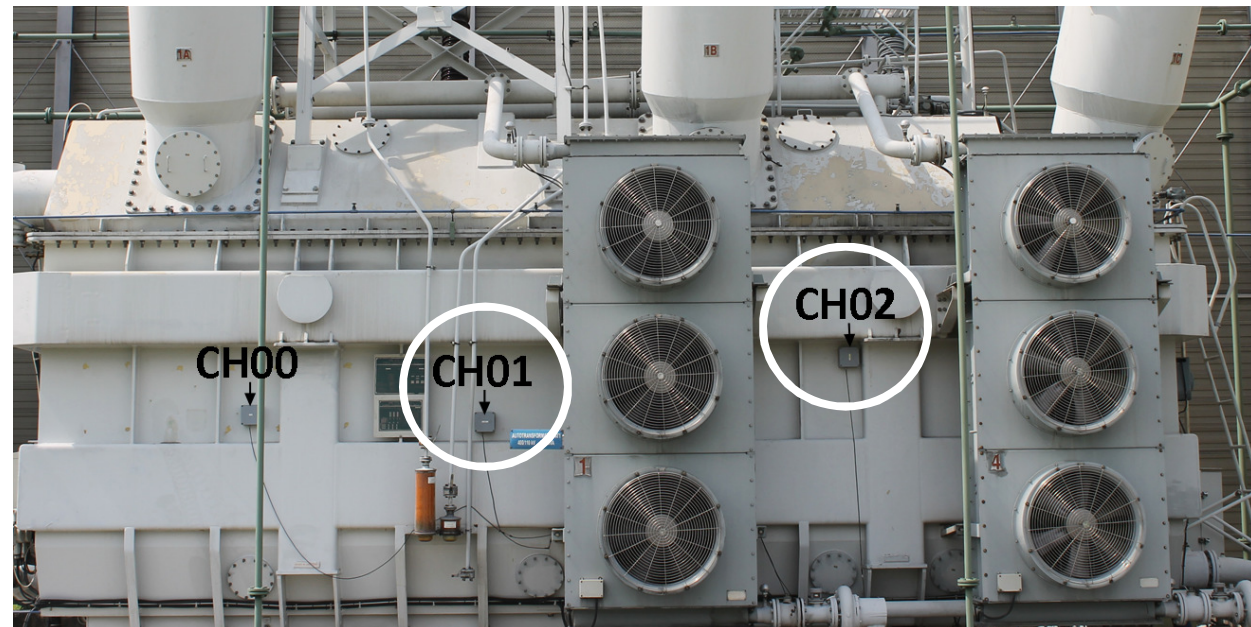
>>> Monitoring on-line WNZ metodą emisji akustycznej <<<

Monitoring długookresowy transformatora 330 MVA

Przykład 1



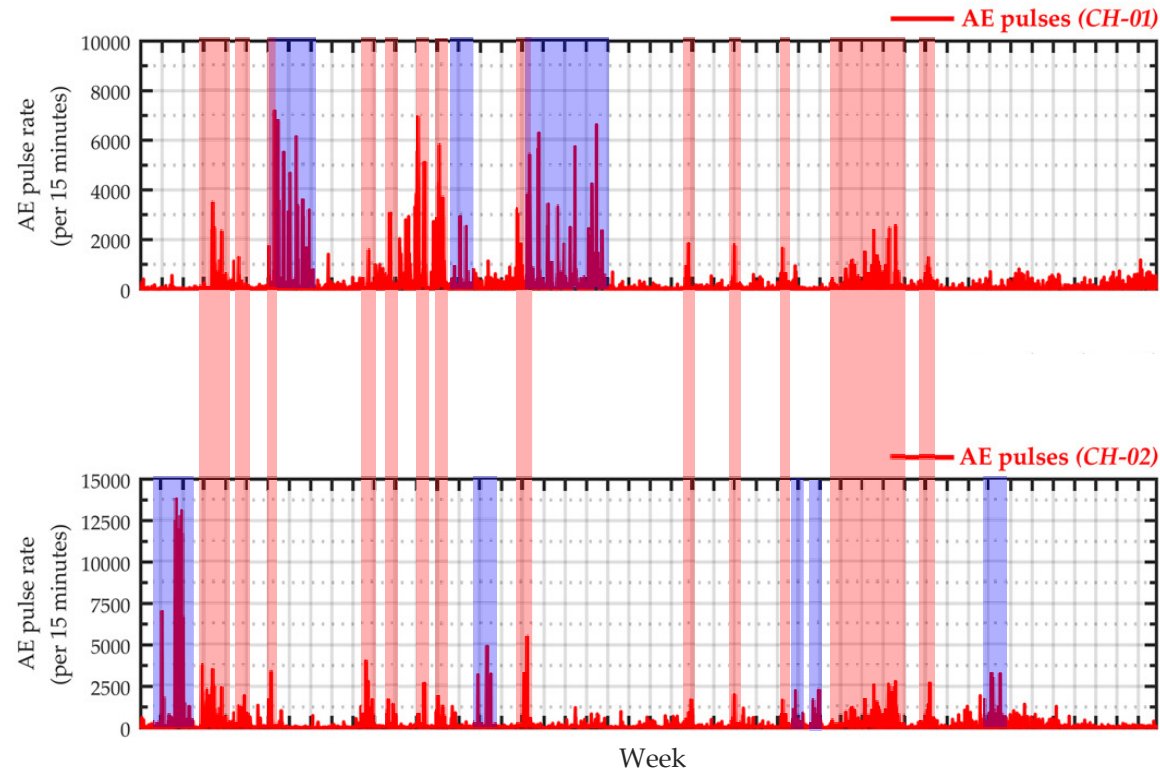
- > System monitoringu pracował przez 48 tygodni
- > Impulsy WNZ rejestrowane były przede wszystkim przez przetworniki zainstalowane po stronie GN (400 kV), w miejscach oznaczonych jako CH01 i CH02.



Rys. Położenie przetworników piezoelektrycznych, które rejestrowały impulsy EA

Monitoring długookresowy transformatora 330 MVA

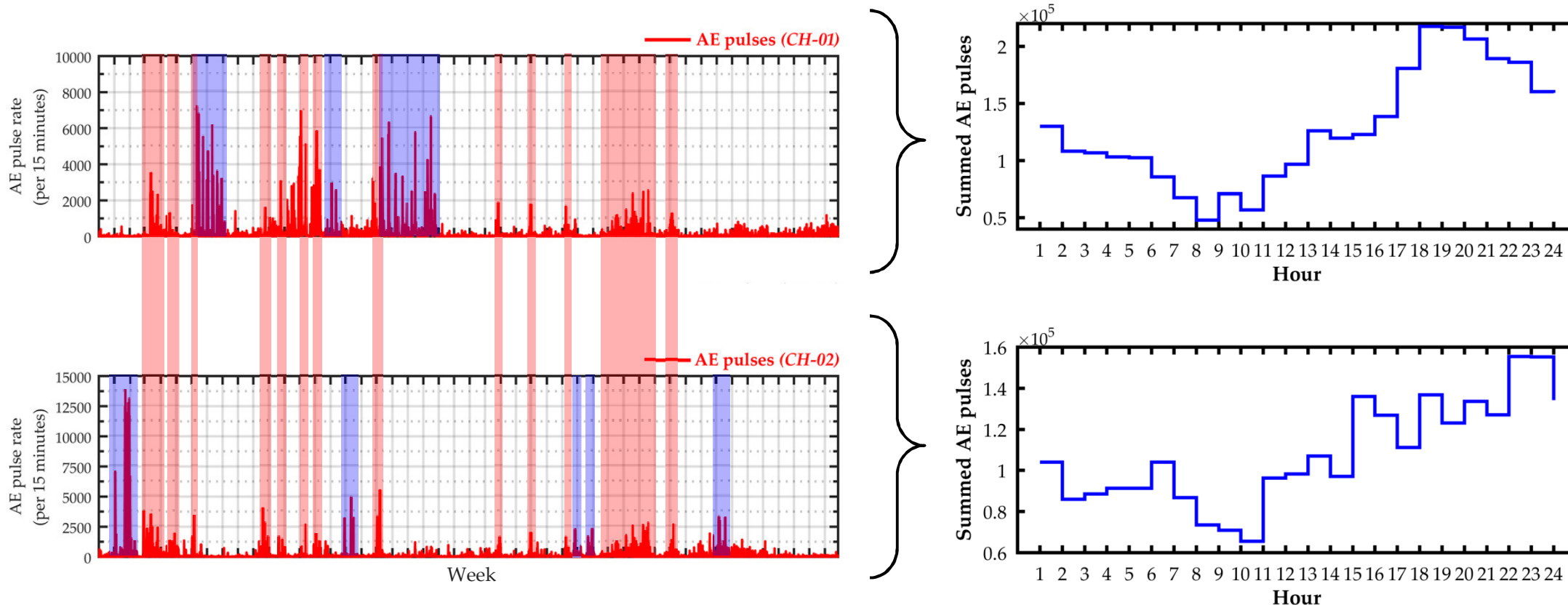
Przykład 1



- Analizując wykresy liczby impulsów EA można wyróżnić zarówno okresy czasu, w których oba przetworniki rejestrowały dużą liczbę impulsów, jak i te okresy, w których tylko jeden z przetworników wykazywał podwyższoną aktywność.

Monitoring długookresowy transformatora 330 MVA

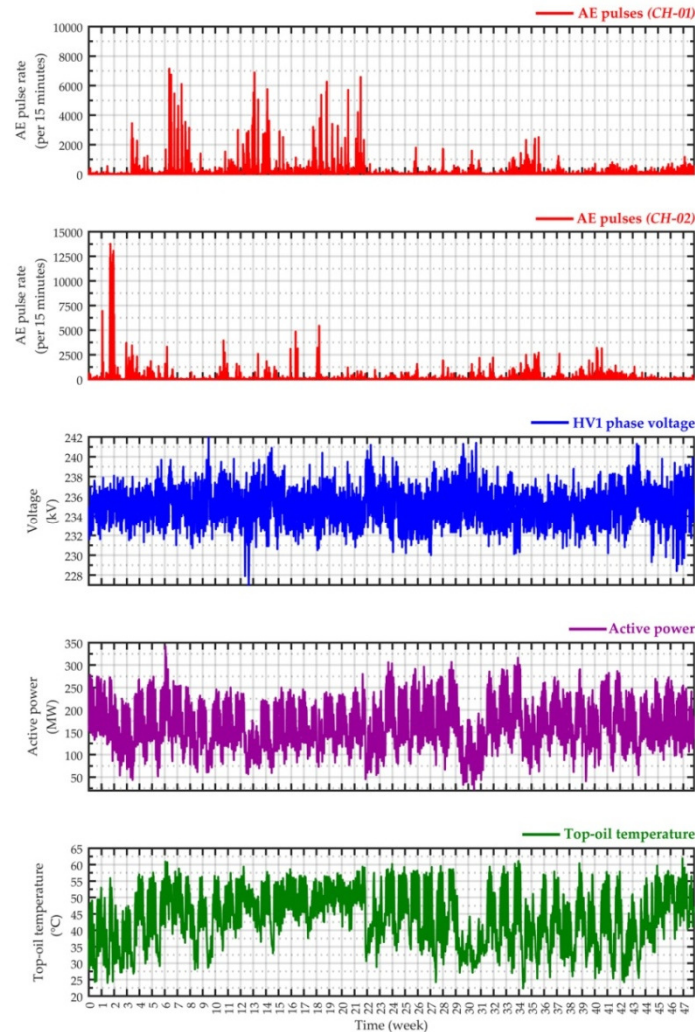
Przykład 1



- Analiza rozkładów dobowych impulsów wykazała, że najniższa aktywność zjawiska WNZ przypadła na godziny przedpołudniowe (od 8:00 do 11:00), a największa w godzinach wieczornych (od 18:00 do 21:00 dla przetwornika CH01 i od 22:00 do 00:00 dla przetwornika CH02).
- Współczynnik korelacji Pearsona dla obu rozkładów wyniósł $r = 0.82$; $p < 0.001$ (silna zależność).

Monitoring długookresowy transformatora 330 MVA

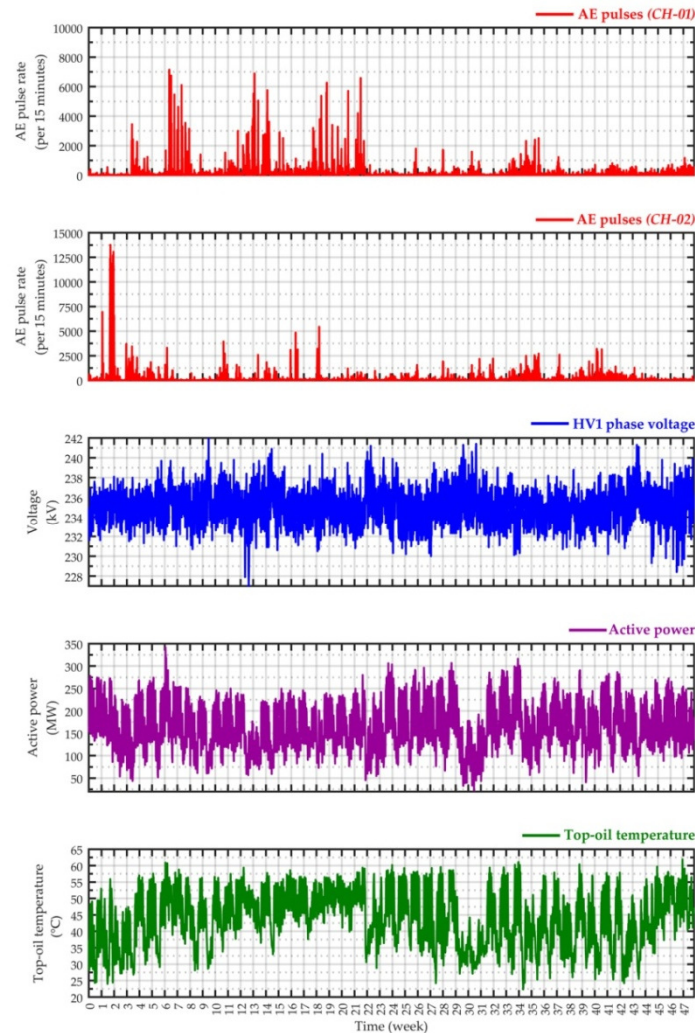
Przykład 1



- Napięcie międzyfazowe mierzone po stronie górnego (400 kV) napięcia zmieniało się w zakresie od 393 kV do 419 kV.
- Moc czynna zmieniała się w zakresie od 23 MW do 342 MW.
- Temperatura górnej warstwy oleju zmieniała się w zakresie od 22°C do 62°C

Monitoring długookresowy transformatora 330 MVA

Przykład 1

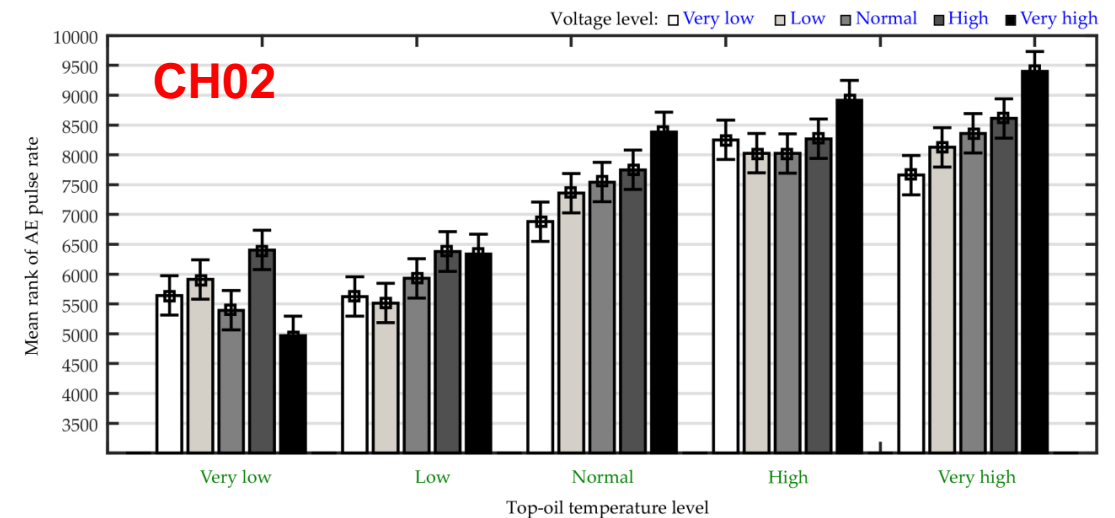
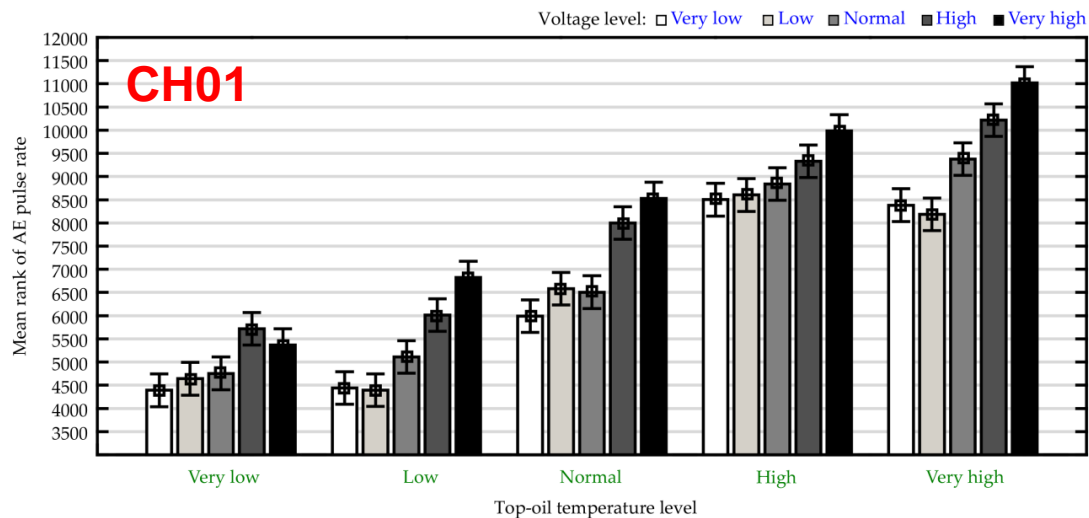


- W celu przetestowania hipotezy, że **intensywność zjawiska wyładowań niezupełnych jest ściśle związana z wartościami temperatury oleju i napięcia**, zdecydowano się przeprowadzić dwuczynnikową analizę wariancji.
- Ponieważ analiza danych wejściowych wykazała, że złamane zostało zarówno założenie o rozkładzie normalnym wyników zmiennej zależnej (istotny wynik testu Kołomogorowa-Smirnowa), jak i założenie o jednorodności wariancji, czyli o podobnym rozproszeniu wyników wokół średniej w każdej z podgrup, z tego powodu zamiast dwuczynnikowej analizy wariancji wykonano alternatywny test nieparametryczny Scheirera-Ray'a-Hare'a.

Monitoring długookresowy transformatora 330 MVA

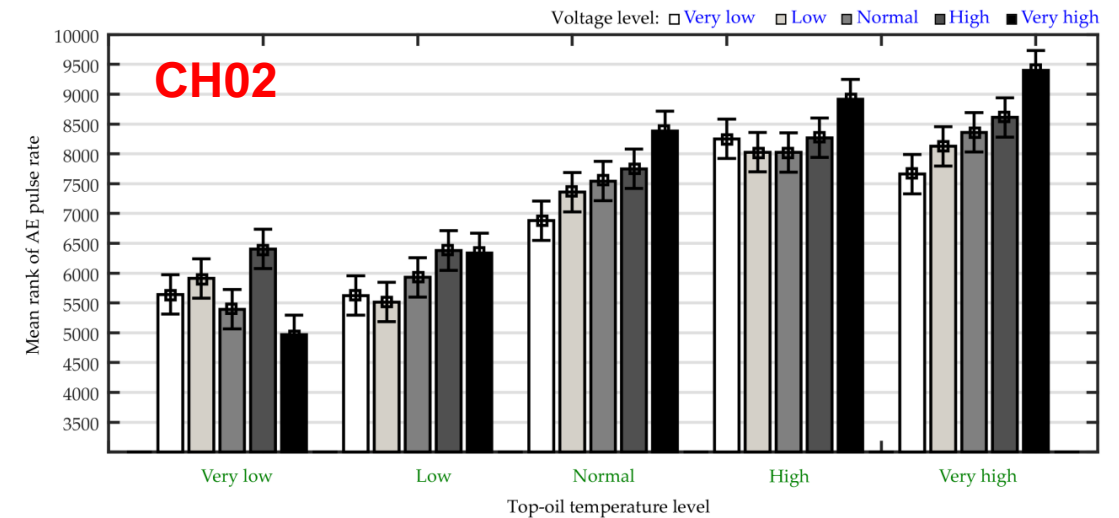
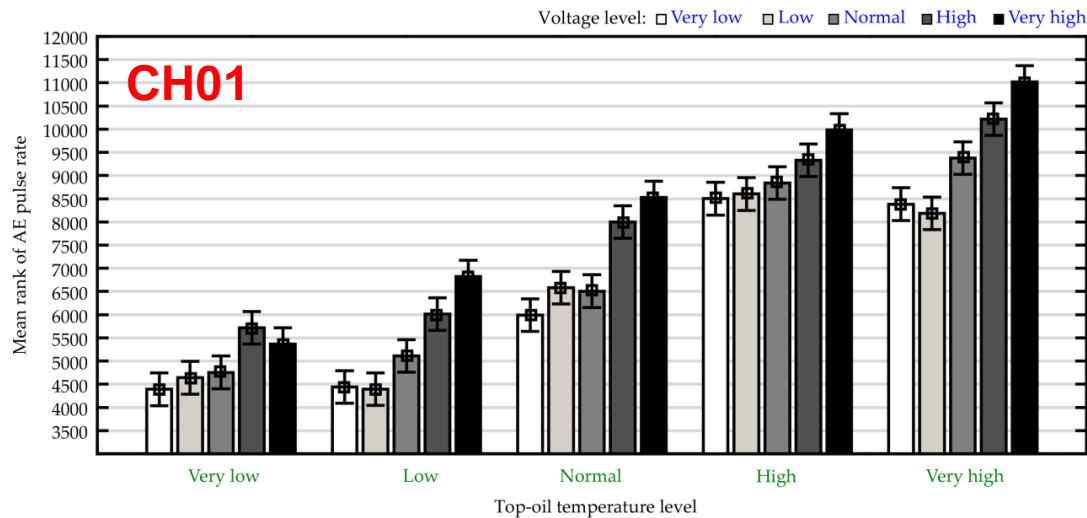
Przykład 1

- Kategoryzację dobowych wartości temperatury oleju i napięcia (zmiennie niezależna) wykonano w oparciu o kwintyle, uzyskując w ten sposób pięć równolicznych grup (poziomy temperatury oleju i napięcia: „bardzo niski”, „niski”, „normalny”, „wysoki” i „bardzo wysoki”).



Monitoring długookresowy transformatora 330 MVA

Przykład 1



	SS	df	MS	H	p-value	sig
Napięcie	8.82E+09	4		513.4415	< 0.05	Tak
Temperatura	4.82E+10	4		2806.906	< 0.05	Tak
Napięcie * Temperatura	1.29E+09	16		74.95313	< 0.05	Tak
Między grupami	1.89E+11	14350				
Ogółem	2.47E+11	14374	17179490			

	SS	df	MS	H	p-value	sig
Napięcie	1.31E+09	4		76.28437	< 0.05	Tak
Temperatura	1.95E+10	4		1131.14	< 0.05	Tak
Napięcie * Temperatura	1.68E+09	16		97.54786	< 0.05	Tak
Między grupami	1.89E+11	14350				
Ogółem	2.47E+11	14374	17179490			

- W rezultacie analiz, dla obu punktów pomiarowych (CH01 i CH02), wykazano, że **wartość temperatury oleju oraz napięcia różnicuje intensywność wyładowań niezupełnych**, przy czym im wyższa jest wartość temperatury oleju i napięcia, tym większa jest liczba rejestrowanych impulsów WNZ.

Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 100 MVA)

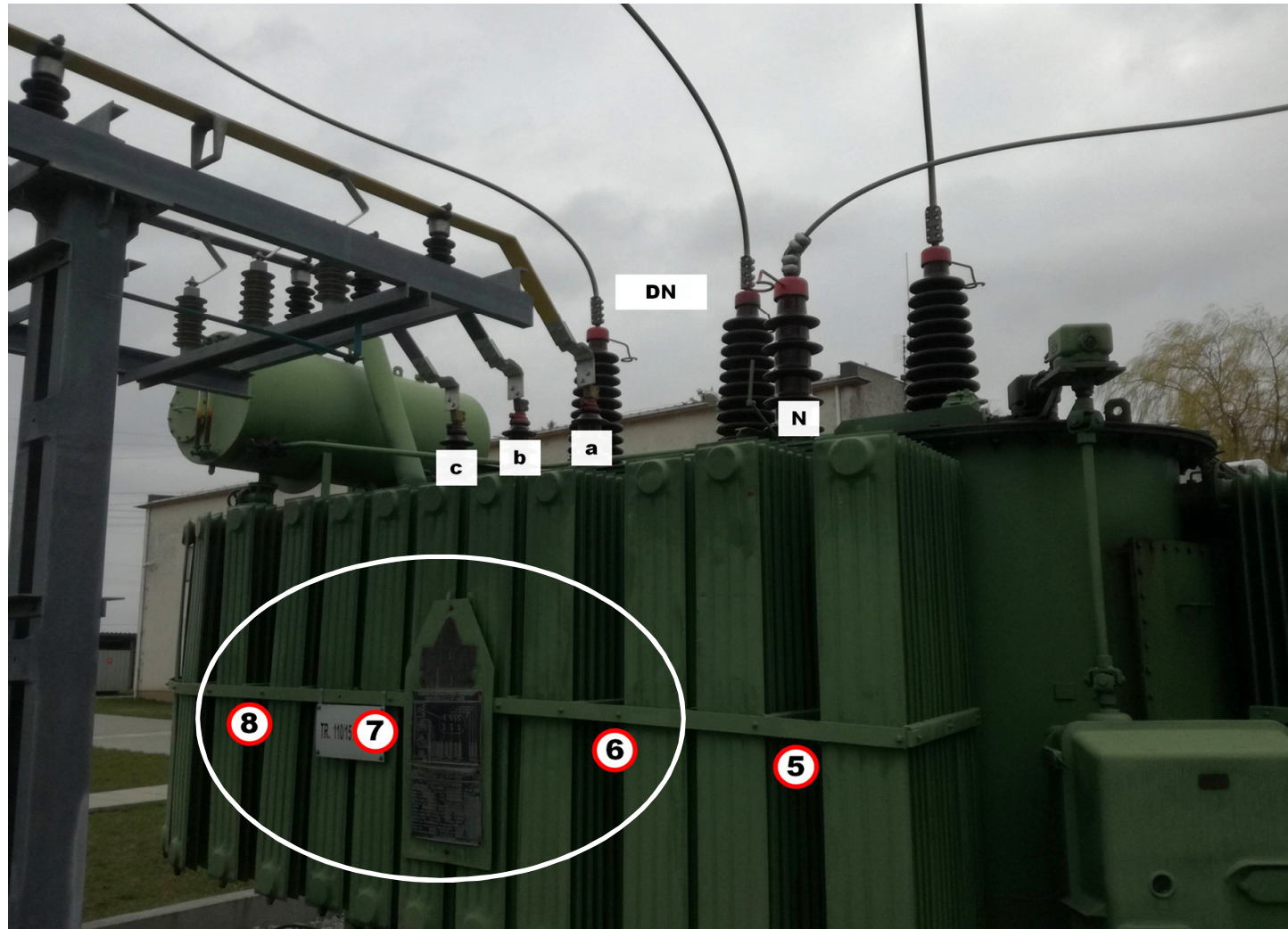


- 8-kanałów A/D; 20 MHz.
- Współpracuje z sensorami emisji akustycznej i przekładnikami prądowymi wysokiej częstotliwości.
- Rejestracja liczby, amplitudy i energii impulsów WNZ w czasie rzeczywistym.
- Aktywnie chłodzona, wodoodporna obudowa.



Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 100 MVA)

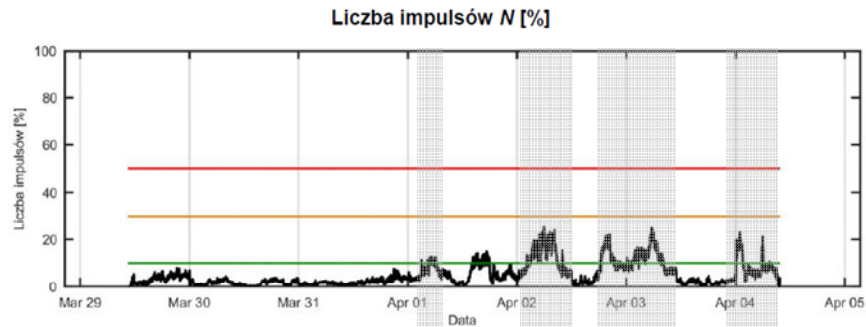
Przykład



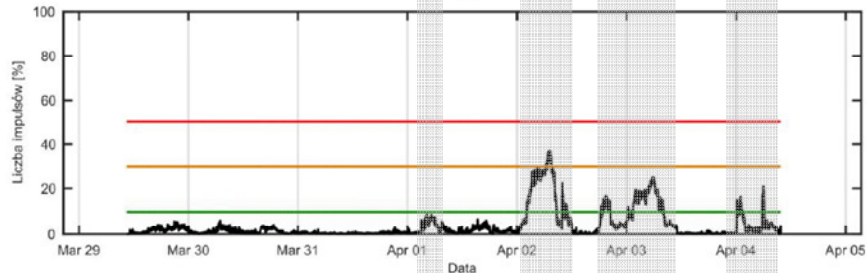
Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 100 MVA)

Przykład

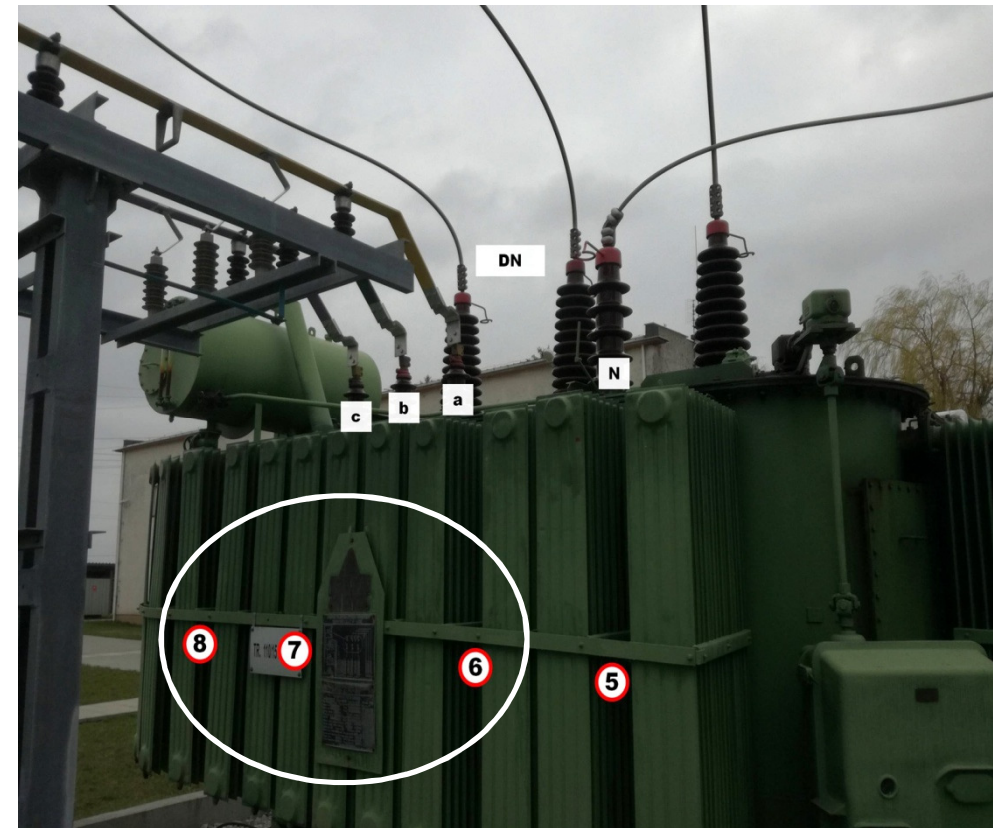
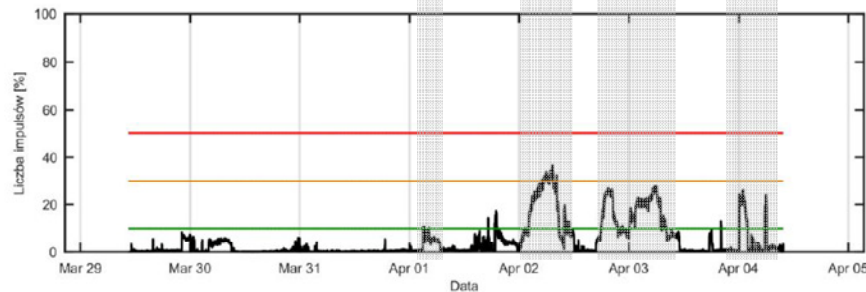
6



7



8





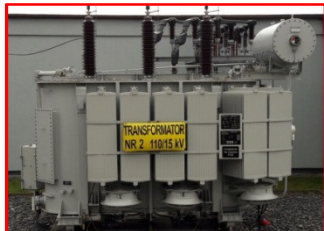
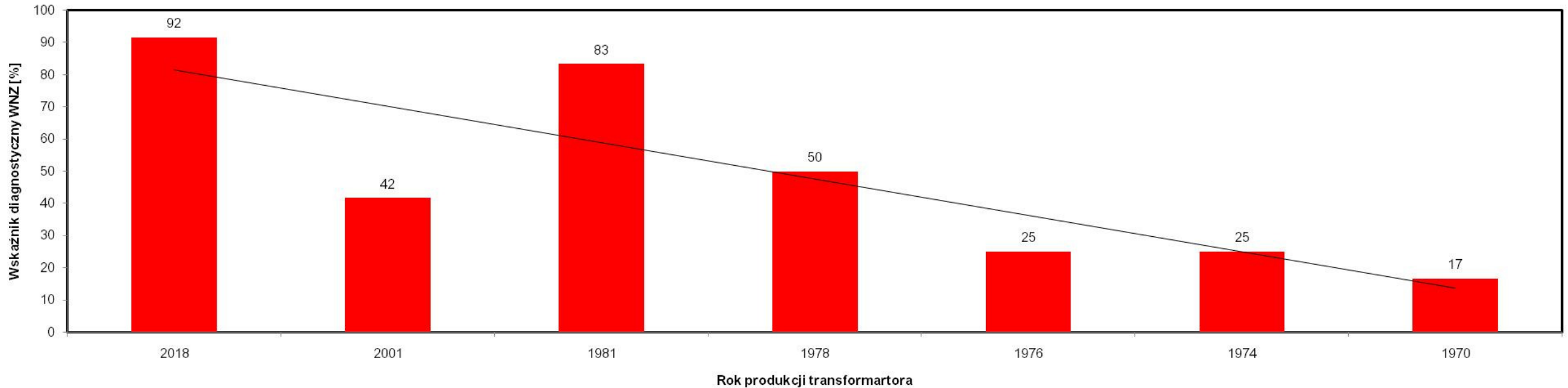
Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 100 MVA)

Parametr	Wartość parametru	Ocena parametru	Wskaźnik DI ₁
N	$\forall N : \{N = 0\}$	brak wyładowań	4
	$\exists N : \{0 < N < 10\}$	mała liczba wyładowań	3
	$\exists N : \{10 < N < 30\}$	podwyższona liczba wyładowań	2
	$\exists N : \{30 < N < 50\}$	wysoka liczba wyładowań	1
	$\exists N : \{N > 50\}$	bardzo wysoka liczba wyładowań	0
Parametr	Wartość parametru	Ocena parametru	Wskaźnik DI ₂
A _{sr}	$A_{sr} < 10\%$	szum lub mała amplituda wyładowań	4
	$30\% > A_{sr} > 10\%$	podwyższona amplituda wyładowań	2
	$50\% > A_{sr} > 30\%$	wysoka amplituda wyładowań	1
	$A_{sr} > 50\%$	bardzo wysoka amplituda wyładowań	0
Parametr	Wartość parametru	Ocena parametru	Wskaźnik DI ₃
N	$\Sigma(N = 0) \gg \Sigma(N > 0)$	sporadyczne, krótkie momenty zapłonu wyładowań	4
	$\exists N : \{N = 0\}$	wyładowania mają charakter okresowy, tzn. okresy aktywności przeplatają się z okresami ich całkowitego wygaszenia***	2
	$\forall N : \{N > 0\}$	wyładowania mają charakter ciągły (niegasnący), trend malejący	1
	$\forall N : \{N > 0\}$	wyładowania mają charakter ciągły (niegasnący), trend stały lub rosnący	0

$$DI_{WNZ} = \frac{\sum_{j=1}^3 DI_j}{12} \cdot 100 [\%]$$

Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 100 MVA)

Wskaźnik diagnostyczny WNZ (DI_{WNZ}) [%]



2018 r.
25 MVA



2001 r.
25 MVA



1981 r.
16 MVA



1978 r.
16 MVA



1976 r.
16 MVA



1974 r.
16 MVA



1970 r.
16 MVA

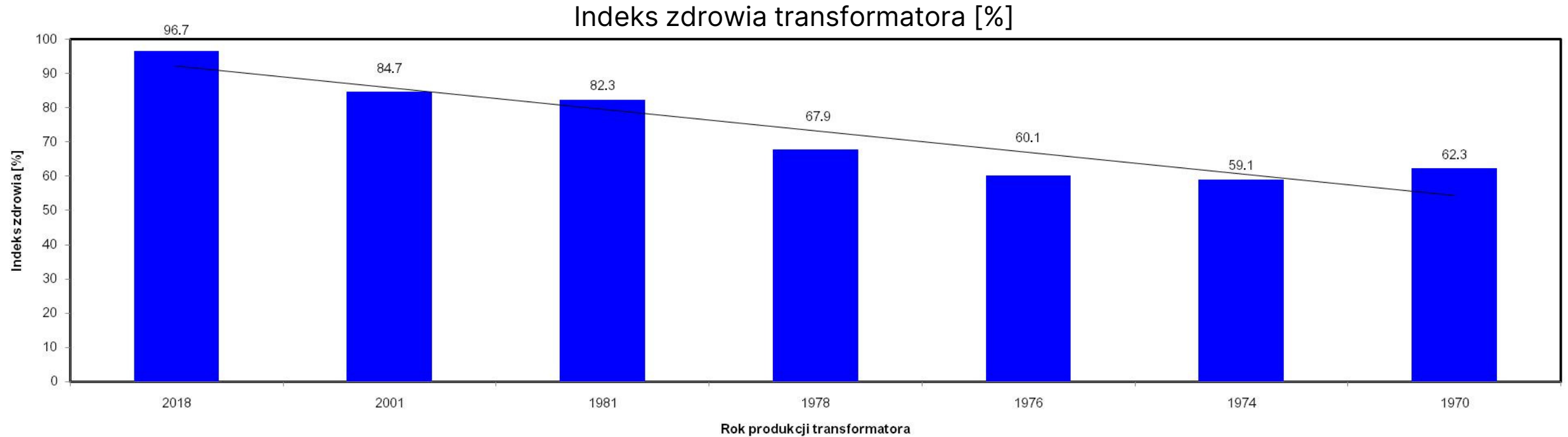


Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 60 MVA)

Wyniki kompleksowej diagnostyki monitorowanych transformatorów

Pomiar				Transformator					
	Moc	25 MVA	25 MVA	16 MVA	16 MVA	16 MVA	16 MVA	16 MVA	
	Rok produkcji	1990	2001	1981	1978	1976	1974	1970	
	Rok produkcji/remontu	2018							
	Wiek jednostki	4	21	41	44	46	48	52	
	oznaczenie wagi	waga	oznaczenie wskaźnika diagnost.	wartość DI					
Wibroakustyka	ciVA	5	DI WA	4	4	4	4	4	2
Termowizja	ciTV	7	DI TV	4	4	2	3	4	4
Emisja akustyczna	ciEA1	8	DI EA1	3	1	4	2	0	1
	ciEA2	8	DI EA2	4	2	4	2	1	0
	ciEA3	8	DI EA3	4	2	2	2	2	2
Rezystancja uzwojeń	ciRU	8	DI RU	4	4	4	4	4	4
FDS- zawilgocenie izolacji	ciFDS	9	DI FDS	3	3	3	1	2	1
tgδ izolacji	ciTgd	8	DI tg	4	4	3	3	1	1
Rezystancja izolacji	ciRizol	8	DI Rizol	4	4	3	2	2	3
SFRA	ciSFRA	8	DI SFRA	4	4	4	4	4	2
DGA	ciDGA	10	DI TGC	4	4	4	4	4	4
Wygląd i kolor	ciwko	1	DI WKO	4	4	1	1	1	1
Napięcie przebicia	cinpo	2	DI NPO	4	4	4	4	4	4
Rezystywność	cireo	4	DI RO50	4	4	4	2	4	4
Współczynnik strat dielektrycznych	ciTgo	4	DI tg50	4	4	4	4	2	4
Liczba kwasowa	ciIko	4	DI NV	4	4	2	2	2	2
Zawartość wody	ciZwo	4	DI WCO	4	4	2	2	0	2
Temperatura zapłonu par oleju	ciZpo	2	DI TZPO	4	4	4	4	4	4
Ogledziny	ciogl	8	DI OG	4	3	3	2	3	3
Izolator L1 FDS	ciL1FDS	1	DI Zawilg Izolator_1A	4	4			2	
Izolator L2 FDS	ciL2FDS	1	DI Zawilg Izolator_1B	4	4			2	
Izolator L3 FDS	ciL3FDS	1	DI Zawilg Izolator_1C	4	4				
Izolator N FDS	ciNFDS	1	DI Zawilg Izolator_1N	4				2	
Izolator L1 tgδ	ciL1tg	1	DI tg_1A	4	4			4	
Izolator L2 tgδ	ciL2tg	1	DI tg_1B	4	4			2	
Izolator L3 tgδ	ciL3tg	1	DI tg_1C	4	4				
Izolator N tgδ	ciNtg	1	DI tg_1N	4				0	
Izolator L1 Rzp	ciL1RZ	1	DI Rezystancja Izolator_1A	4	4			4	
Izolator L2 Rzp	ciL2Rz	1	DI Rezystancja Izolator_1B	4	4			4	
Izolator L3 Rzp	ciL3Rz	1	DI Rezystancja Izolator_1C	4	4				
Izolator N Rzp	ciNRz	1	DI Rezystancja Izolator_1N	4				4	

Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 60 MVA)



2018 r.
25 MVA



2001 r.
25 MVA



1981 r.
16 MVA



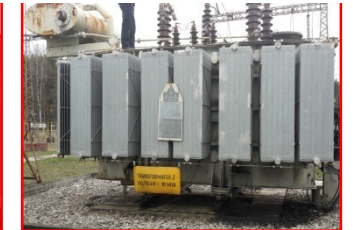
1978 r.
16 MVA



1976 r.
16 MVA



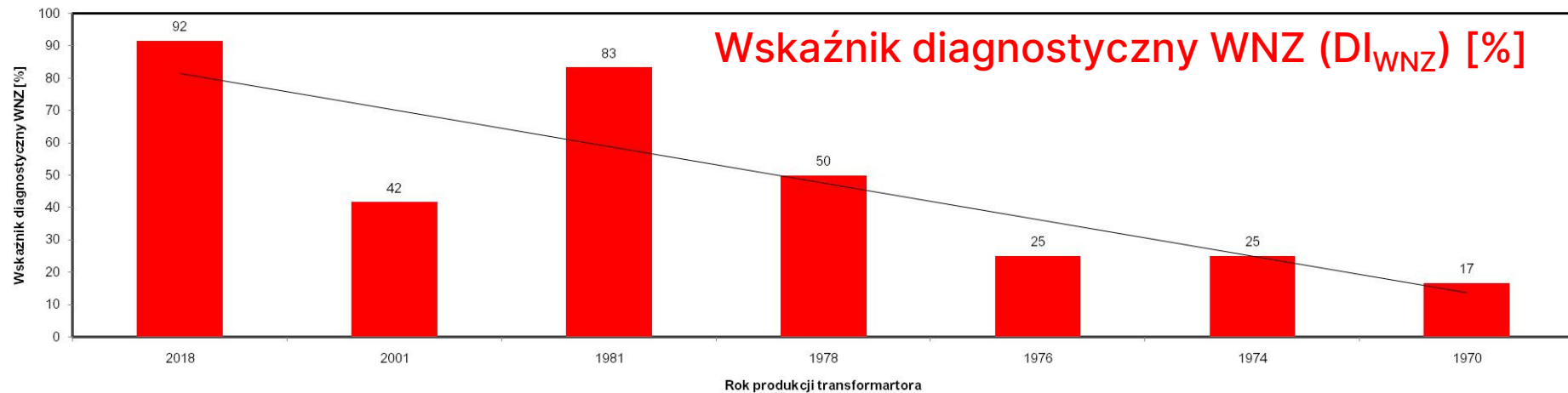
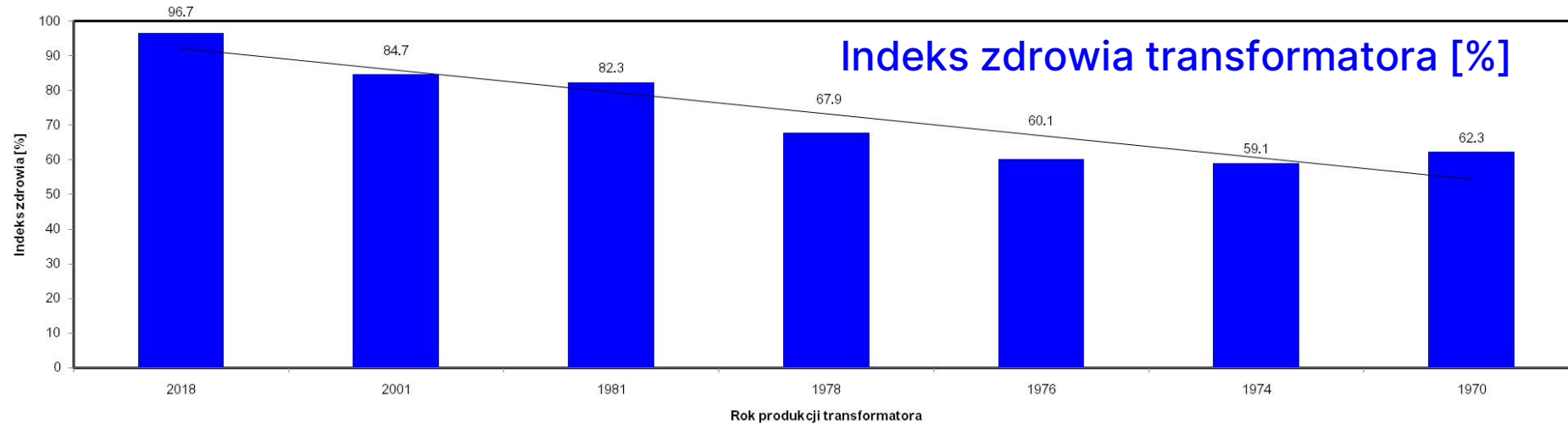
1974 r.
16 MVA



1970 r.
16 MVA



Monitoring krótkookresowy transformatorów II grupy (< 60 MVA)



>>> Monitoring on-line WNZ metodami elektromagnetycznymi
HF/UHF oraz metodą emisji akustycznej <<<

Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

Przykład

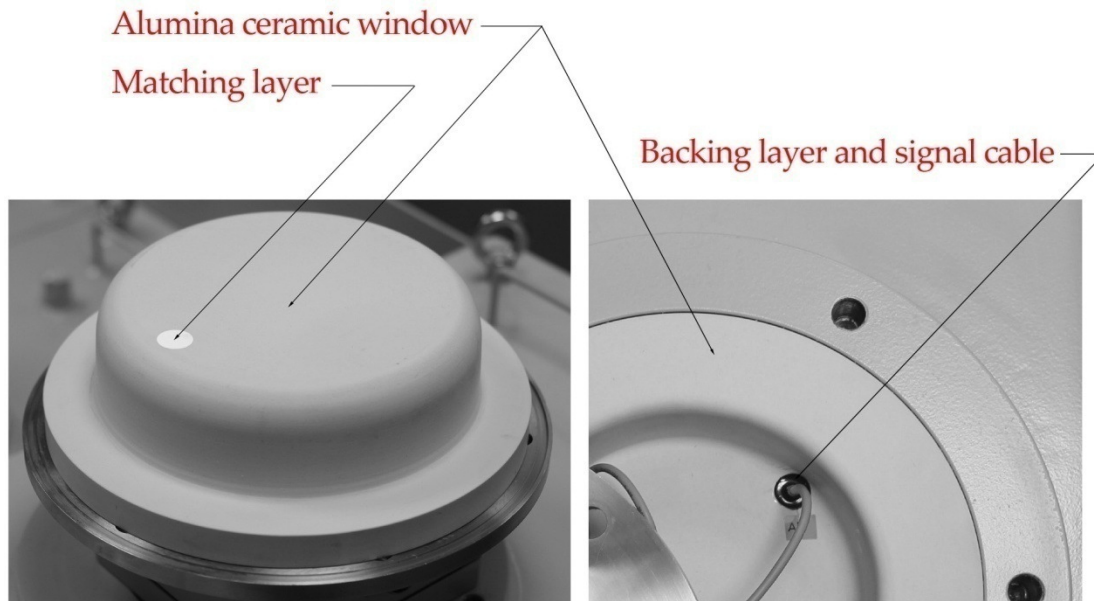


- Moc: 31,5 MVA
- Napięcia GN/DN: 115/33 kV
- 2004
- Data instalacji: 2018

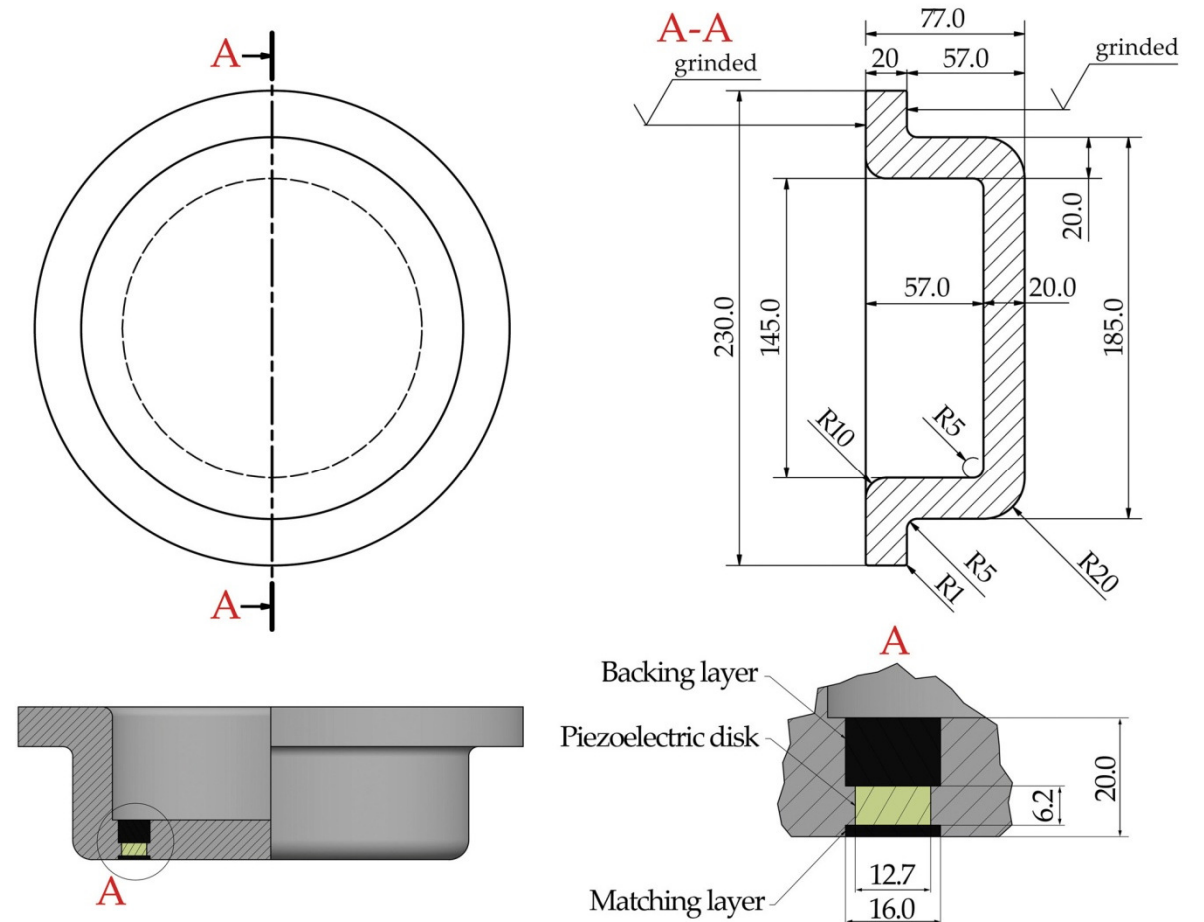
Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

Przykład

Aktywne okno dielektryczne (ADW)



Rys. Elementy sensora emisji akustycznej wbudowane w okno dielektryczne

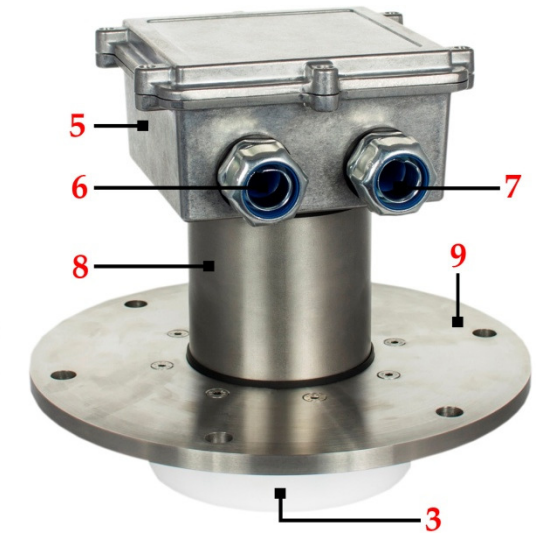
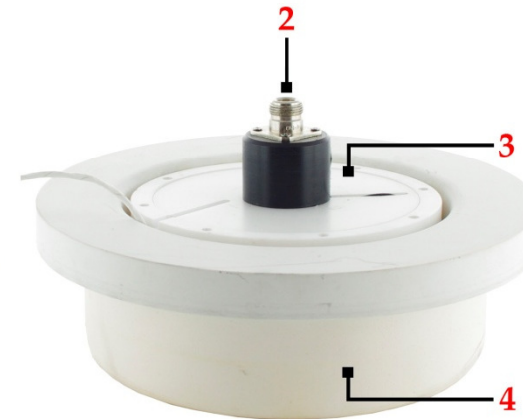
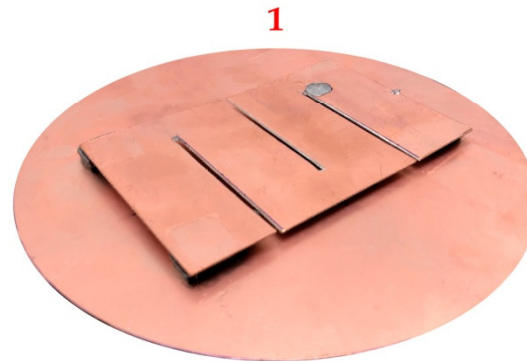
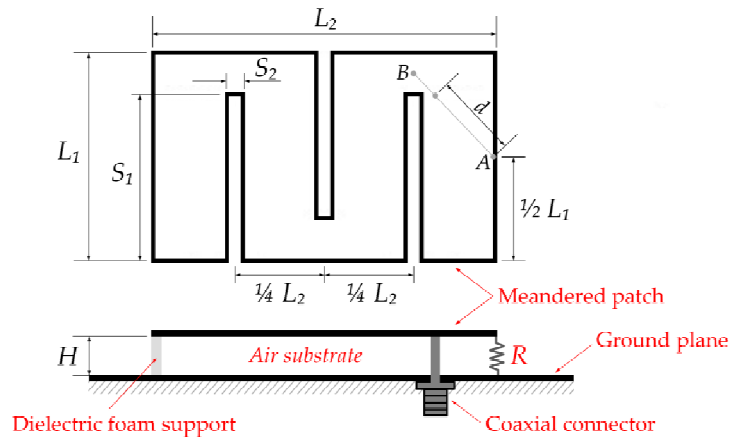


Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

Przykład

Antena UHF

Meandrowana antena planarna typu „odwrócone F”



Elementy składowe zintegrowanego sensora akustyczno-elektromagnetycznego: 1 = meandrowana PIFA, 2 = złącze N, 3 = obudowa teflonowa, 4 = aktywne okno dielektryczne, 5 = obudowa modułu elektronicznego, 6 = dławnica przewodu sygnałowego, 7 = dławnica przewodu zasilającego, 8 = ekran przewodów, 9 = pokrywa wjazdu rewizyjnego

Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

Przykład

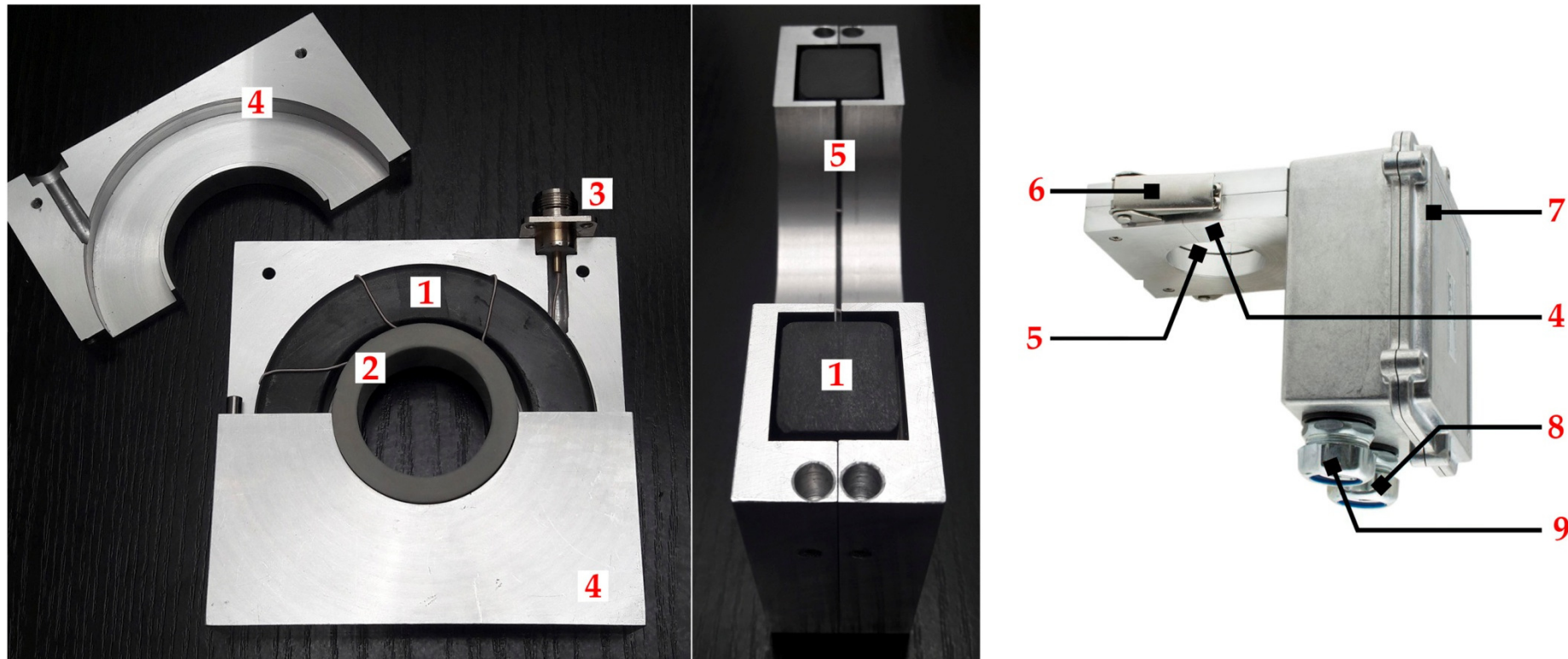
Instalacja aktywnych okien dielektrycznych i anten UHF



Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

Przykład

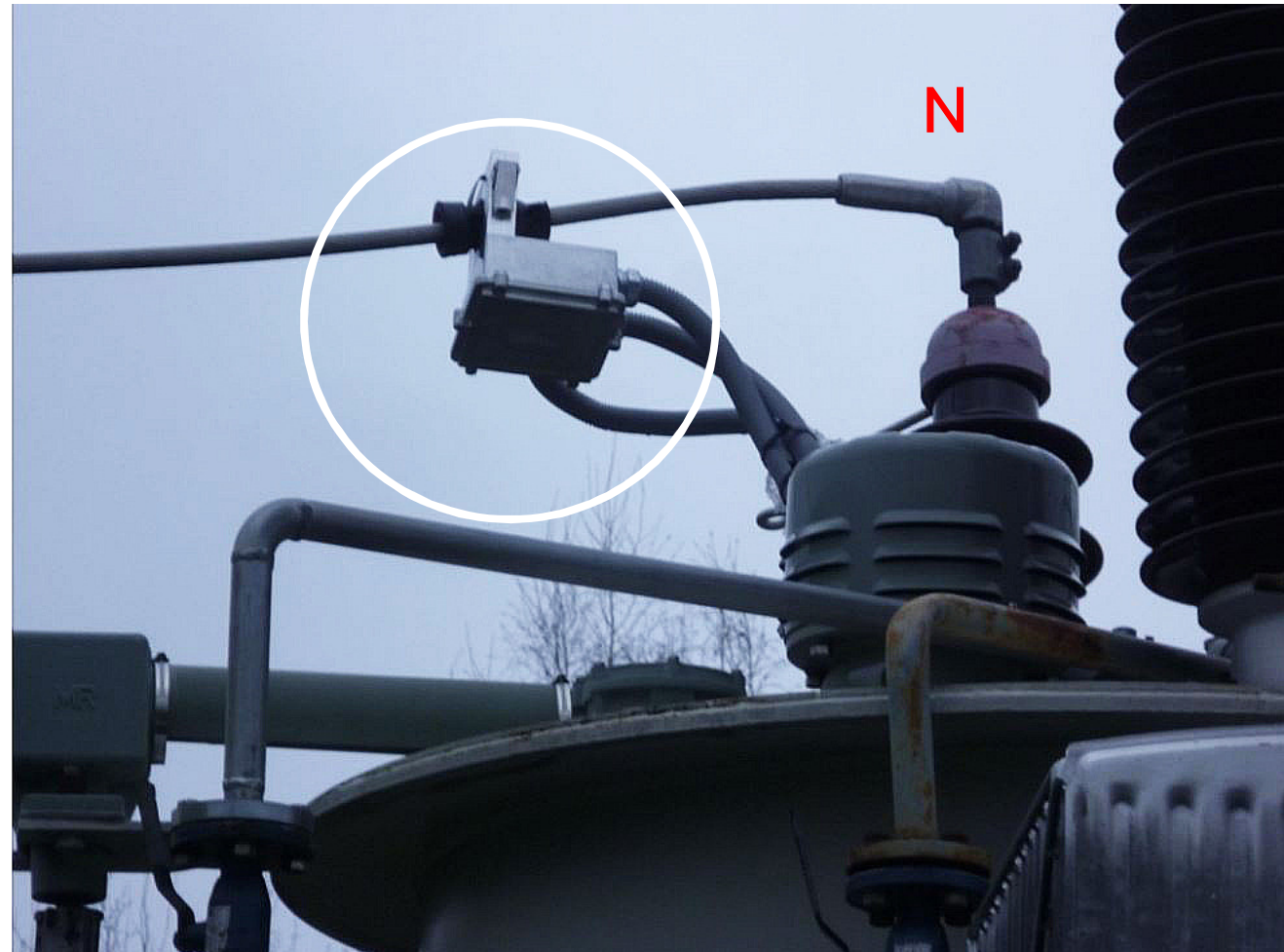
Przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości (sensor HFCT)



Elementy składowe sensora HFCT: 1 = rdzeń ferrytowy (MnZn) z uzwojeniem, 2 = izolacja, 3 = złącze koncentryczne typu N, 4 = aluminiowa obudowa, 5 = szczelina, 6 = zatrask, 7 = wodoodporna obudowa elektroniczna, 8 = dławnica przewodu zasilającego, 9 = dławnica przewodu światłowodowego.

Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

Przykład

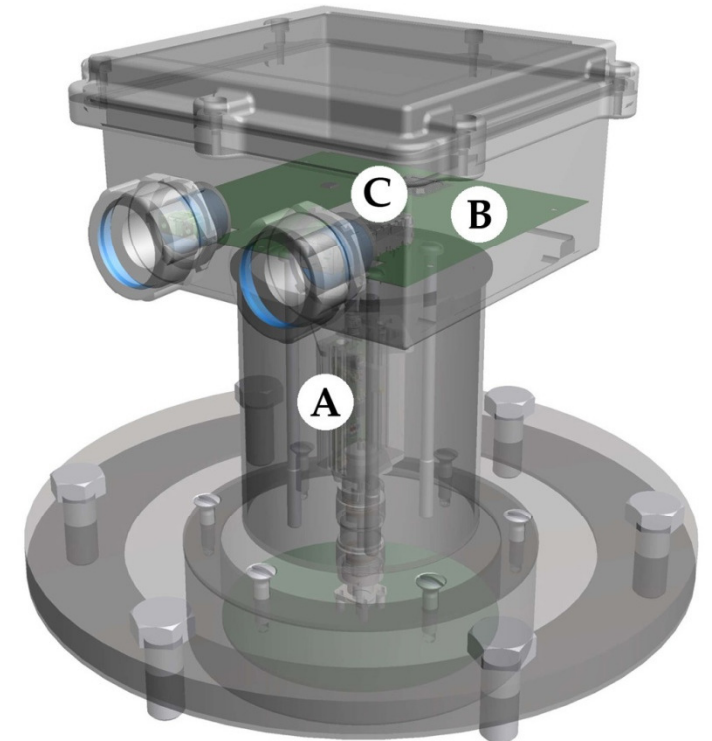
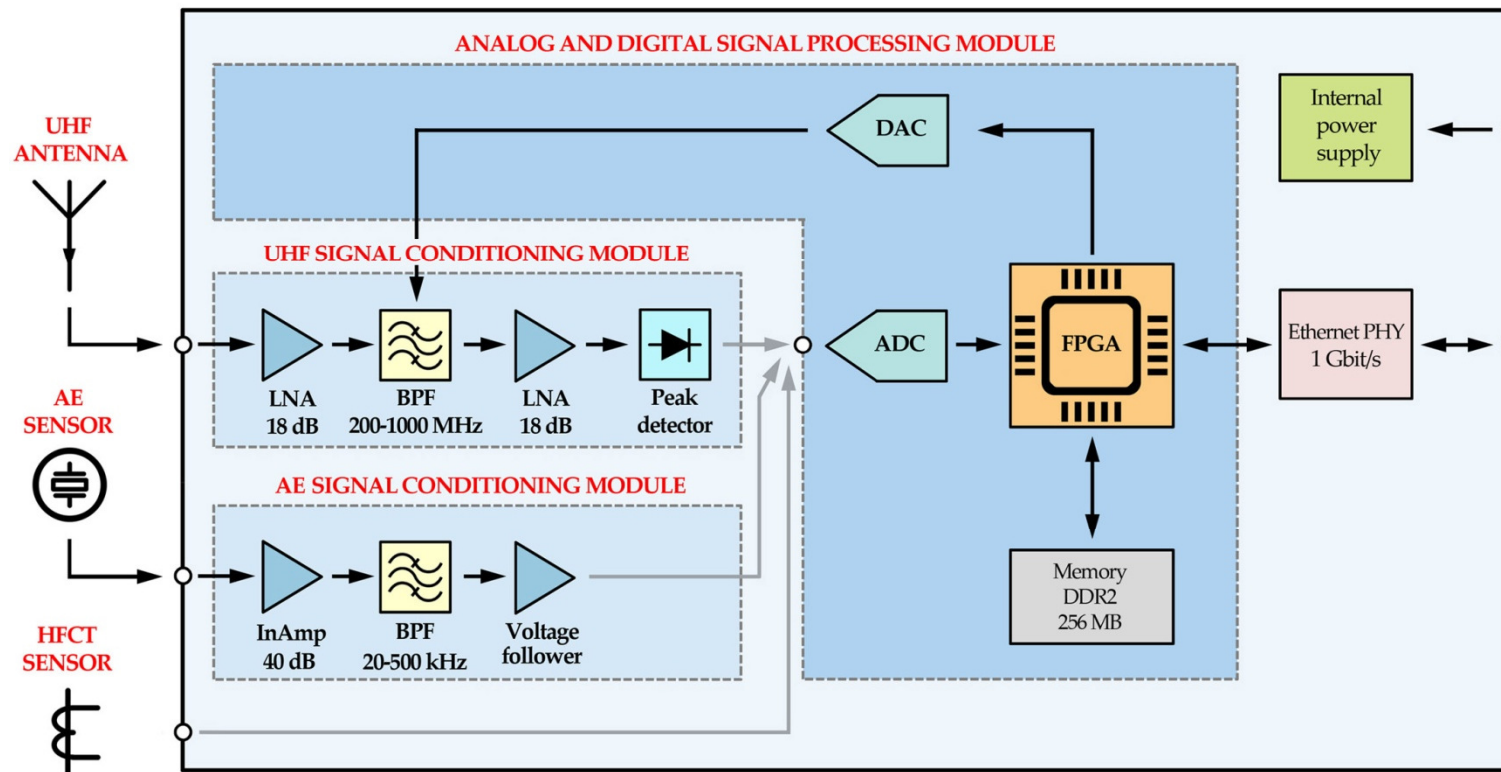


Przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości (sensor HFCT) zainstalowany na uziemieniu punktu neutralnego N

Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

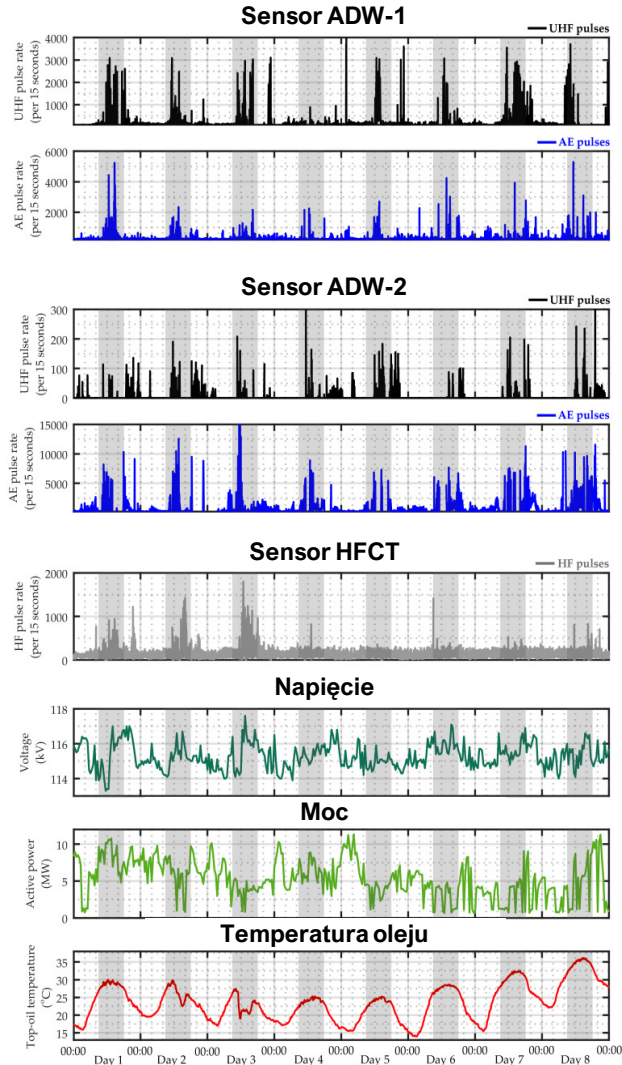
Przykład

Analogowo-cyfrowy moduł kondycjonowania i przetwarzania sygnałów WNZ



Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

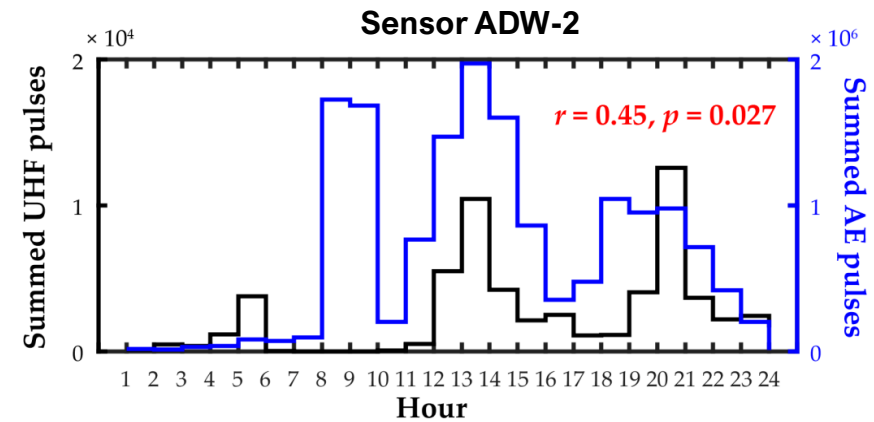
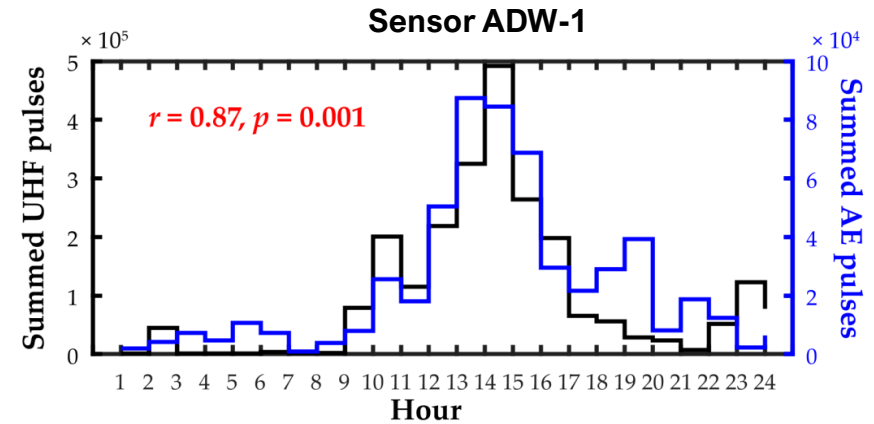
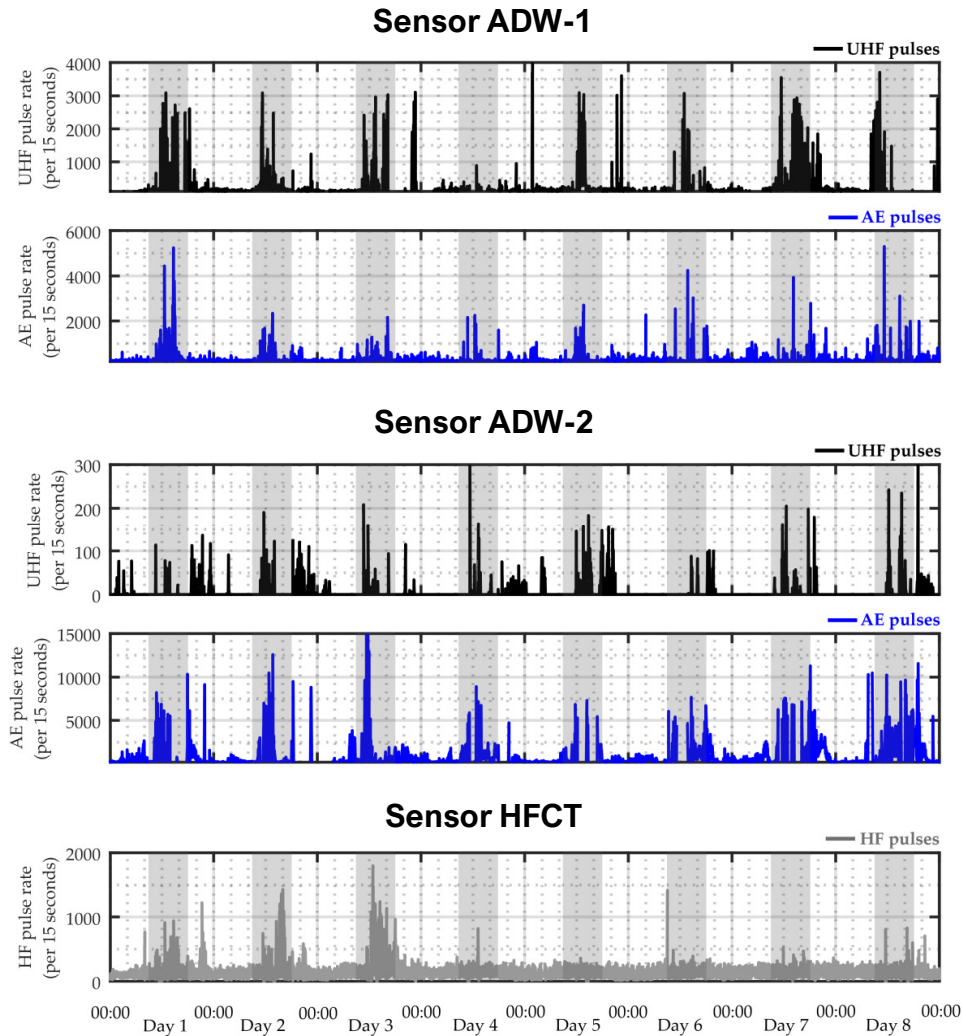
Przykład



- Wyładowania niezupełne rejestrowano każdego dnia, a ich aktywność przypadała głównie na godziny z przedziału od 8:45 do 17:45 p.m. (przedziały zaznaczono szarym kolorem).
- Suma impulsów z tego przedziału stanowi 68.9% wszystkich zarejestrowanych impulsów.
- Szczytowa intensywność wyładowań przypadała na godziny 13:00–15:00. Na ten krótki przedział czasu przypadało aż 24.4% wszystkich zarejestrowanych impulsów
- Wartość napięcia zmieniała się w wąskim zakresie od 113.3 kV do 117.6 kV. Z powodu niewielkiej zmienności napięcia, zdecydowano się nie badać jego wpływu na intensywność wyładowań niezupełnych.
- W ciągu analizowanych 8 dni pracy systemu, transformator był obciążony stosunkowo małą mocą - od 0.68 MVA do 11.34 MVA, co stanowiło odpowiednio 2.15% i 36.00% jego mocy znamionowej.

Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

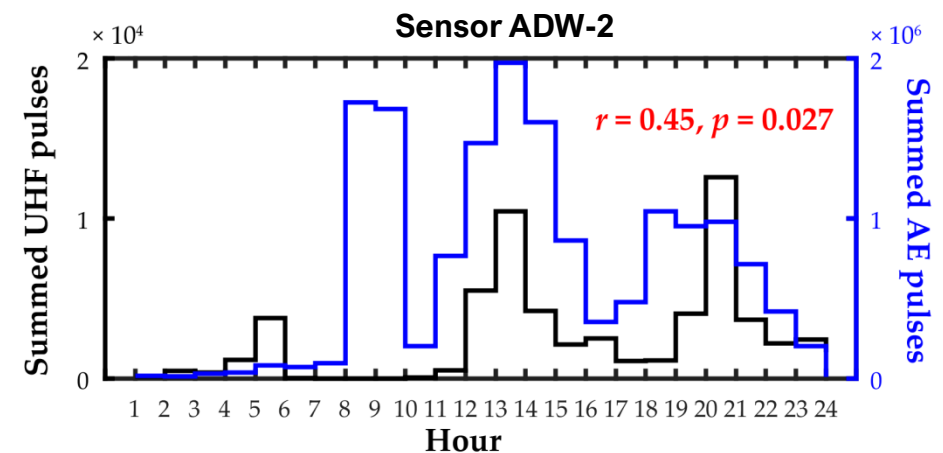
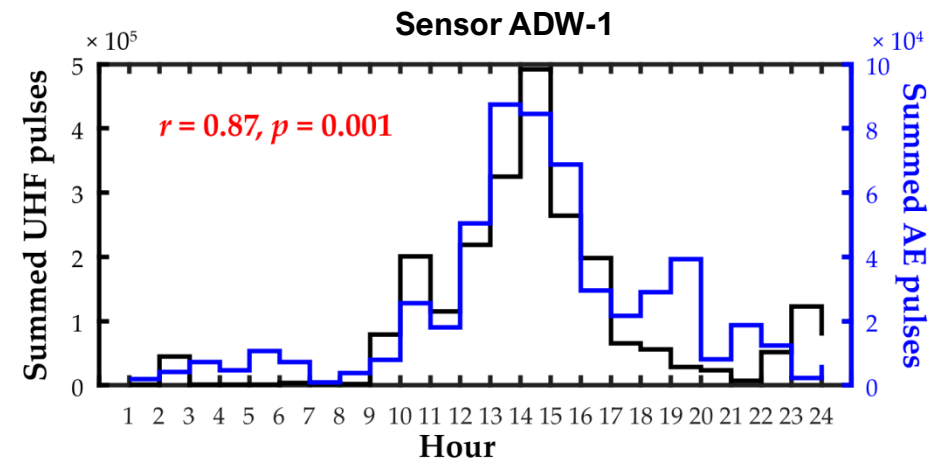
Przykład



Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

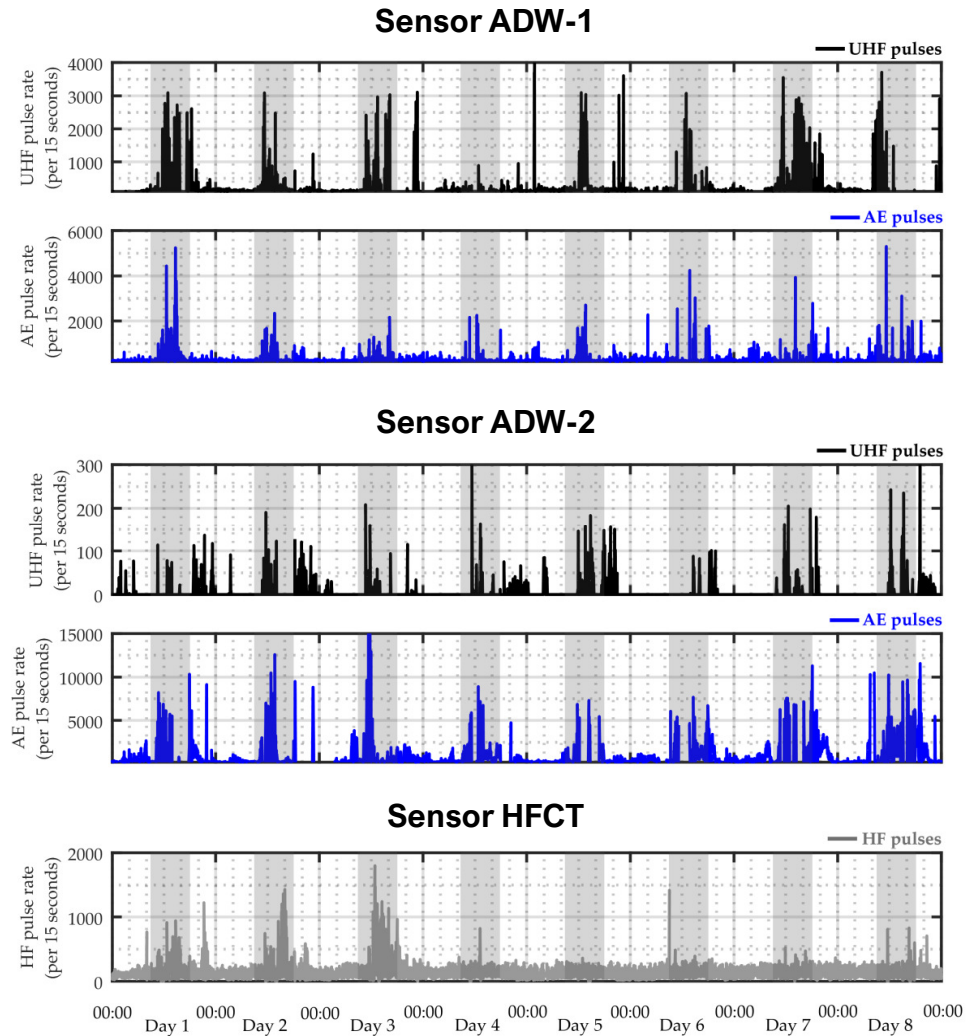
Przykład

- Współczynnik korelacji Pearsona między rozkładem godzinowym impulsów akustycznych i UHF dla sensora ADW-1 wyniósł $r = 0.87$, $p = 0.001$ (silna zależność)
- Dla sensora ADW-2 wartość współczynnika korelacji wyniosła $r = 0.45$, $p = 0.027$ (umiarkowana zależność).



Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

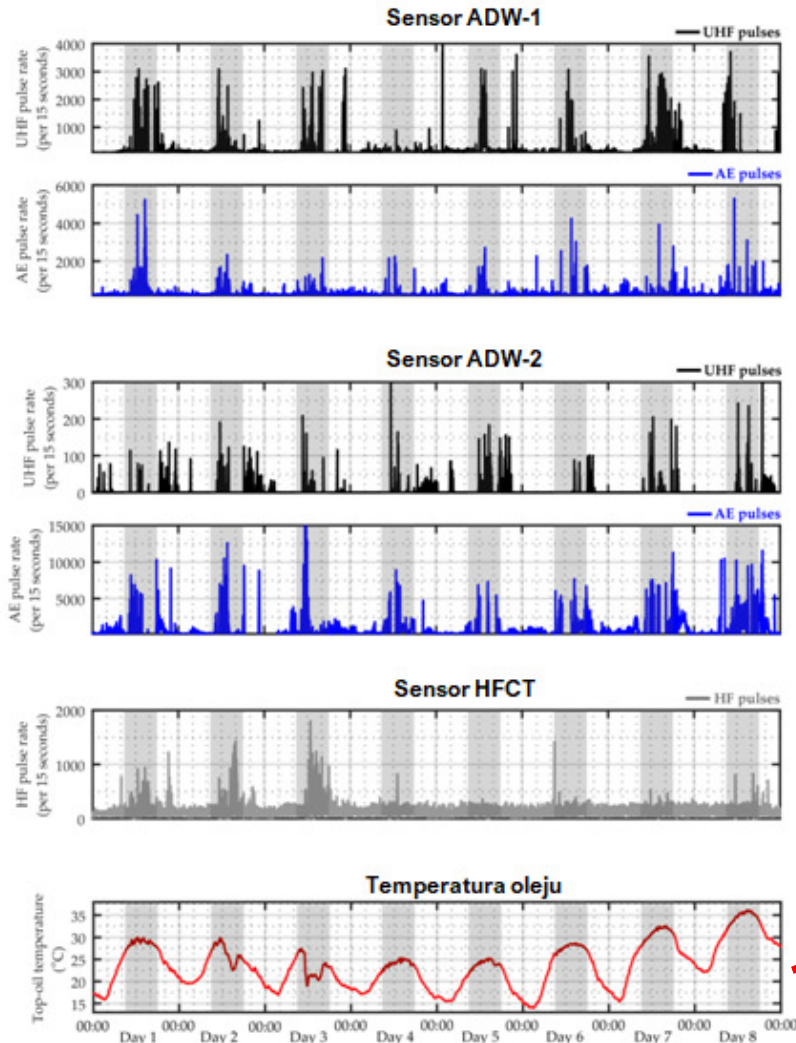
Przykład



- Rozkład godzinowy impulsów wnz rejestrowanych przekładnikiem prądowym wysokiej częstotliwości najbardziej korelował się z rozkładem uzyskanym dla przetwornika EA ($r = 0.68$, $p < 0.001$) i anteny UHF ($r = 0.62$; $p = 0.001$) sensora ADW-1.
- W przypadku sensora ADW-2 współczynnik korelacji był niższy i wyniósł ($r = 0.44$, $p = 0.031$) dla przetwornika akustycznego i ($r = 0.22$; $p = 0.031$) dla anteny UHF.

Monitoring on-line WNZ metodami HF/UHF/EA

Przykład



- temperatura oleju zmieniała się w zakresie od **14.0°C** do **36.1°C**.
- zaobserwowano, że **dobowe maksima temperatury oleju pokrywają się z okresami wzmożonej aktywności wyładowań niezupełnych** (od 8:45 am do 5:45 pm)
- dla dobowych minimów krzywej temperatury oleju obserwowano wyraźne zmniejszenie lub całkowity zanik aktywności wyładowań niezupełnych.
- w celu przetestowania postawionej hipotezy, że **poziomu temperatury oleju wpływa na intensywność zjawiska wyładowań niezupełnych w monitorowanym transformatorze**, zdecydowano się przeprowadzić jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA) dla prób niezależnych; **uzyskano wynik istotny statystycznie**.



Monitoring on-line WNZ - wnioski

- Analiza zebranych danych na monitorowanych transformatorach wykazała, że wyładowania niezupełne przejawiają cechy zjawiska quasi-periodycznego, a ich intensywność – co zostało udowodnione statystycznie – zależy od temperatury oleju i wartości napięcia.
- Równoczesne zastosowanie na monitorowanym transformatorze różnych sensorów WNZ jak anteny UHF, przekładniki prądowe wysokiej częstotliwości i przetworniki emisji akustycznej pozwala zwiększyć wiarygodność detekcji wyładowań.
- Monitoring krótkookresowy WNZ może być wiarygodnym wskaźnikiem stanu układu izolacyjnego transformatora.
- Długookresowa instalacja systemu monitoringu WNZ w połączeniu z nadrzędnym systemem stacyjnym SCADA monitorującym podstawowe parametry pracy jednostki (napięcie, temperatura oleju itd.) może zapobiec niebezpiecznej i kosztownej awarii transformatora.

LOKALIZACJA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W TRANSFORMATORACH ENERGETYCZNYCH

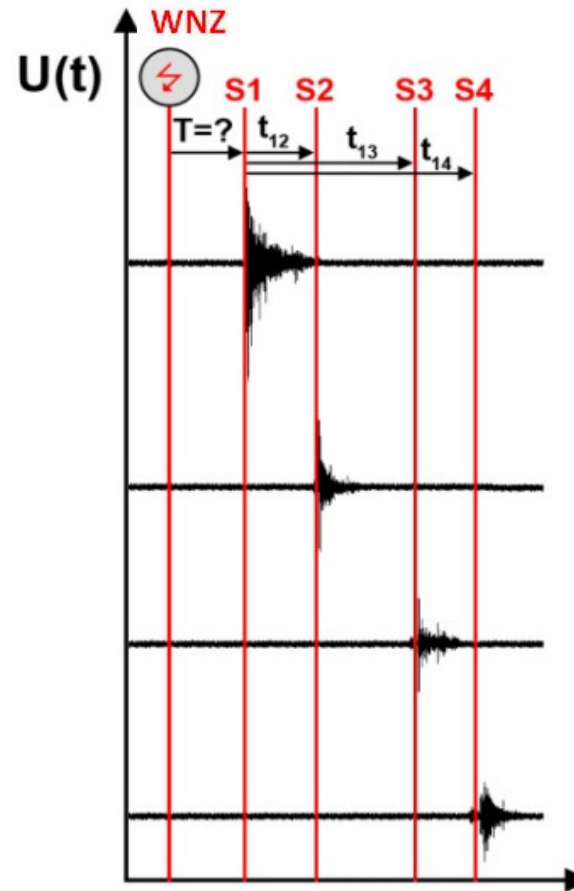
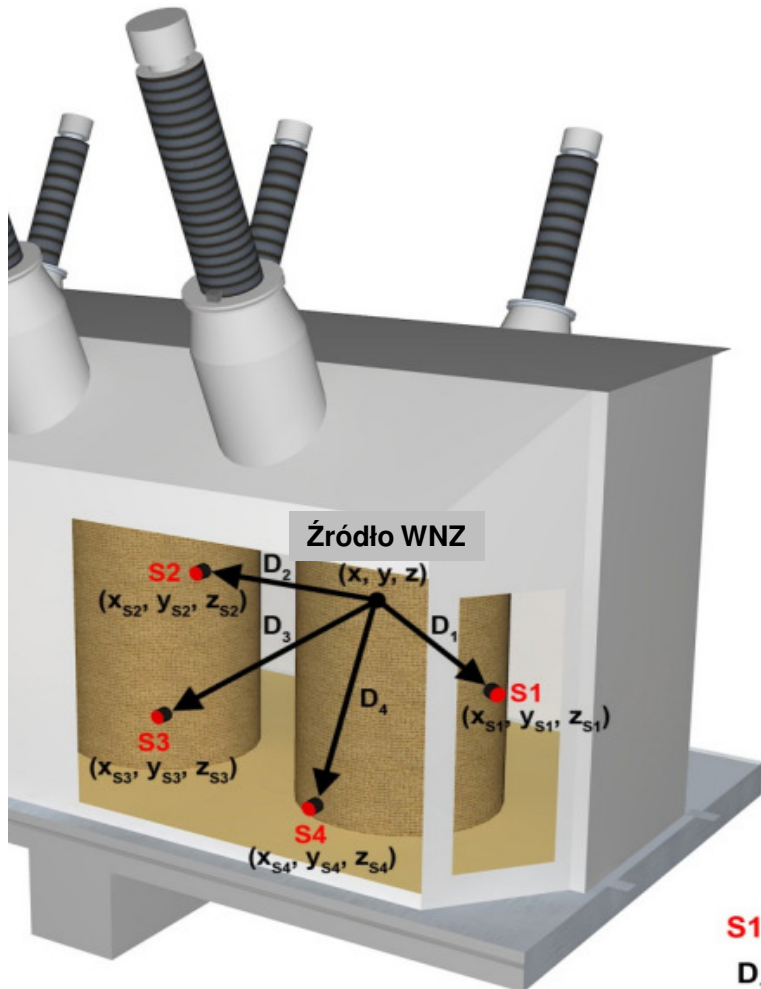


Metody lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych:

- > Metoda trilateracyjna TDoA (ang. Time Difference of Arrival)
- > Standardowa i zaawansowana metoda osłuchowa
- > Estymacja kierunku nadejścia sygnału DoA (ang. Direction of Arrival)
- > Metoda „odwróconego czasu” (ang. Time Reversal Method)

>>> Metoda trilateracyjna TDoA (ang. Time Difference of Arrival) <<<

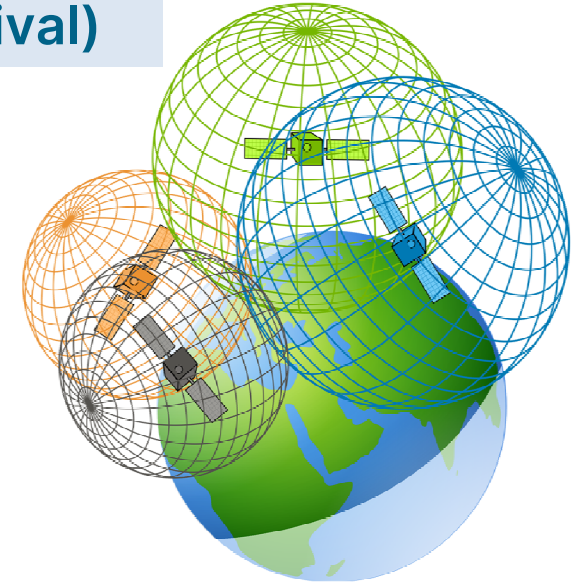
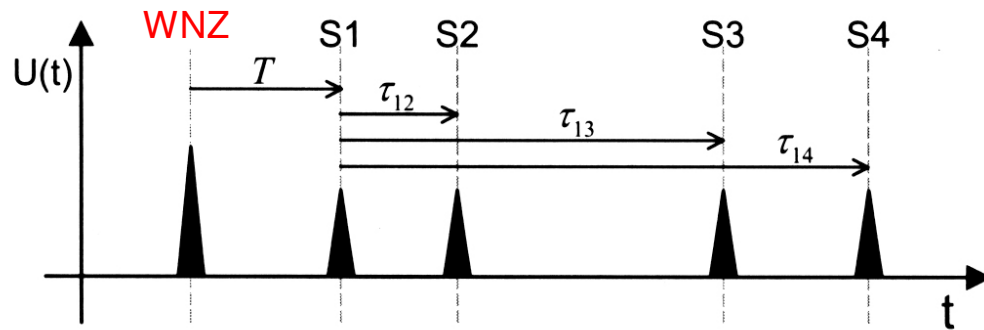
Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)



S1-S4 Przetworniki emisji akustycznej

D₁-D₄ Odległości od źródła wnz do przetworników EA

Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)



Źródło: <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>

$$(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2 = (v_s \cdot T)^2$$

$$(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{12}))^2$$

$$(x - x_{s3})^2 + (y - y_{s3})^2 + (z - z_{s3})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{13}))^2$$

$$(x - x_{s4})^2 + (y - y_{s4})^2 + (z - z_{s4})^2 = (v_s \cdot (T + \tau_{14}))^2$$

Równanie sfery o środku w punkcie o współrzędnych (a, b, c) i promieniu r :
 $(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = r^2$

Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

```
from scipy.optimize import fsolve
from math import exp
```

```
S1_x = 6
S1_y = 0
S1_z = 1.75
S2_x = 6.75
S2_y = 0
S2_z = 2.5
S3_x = 8
S3_y = 1
S3_z = 2.0
S4_x = 8
S4_y = 0.75
S4_z = 1.5
v = 1415
t12 = 3.82006E-05
t13 = 0.000221808
t14 = 0.000323488
```



```
def equations(vars):
```

```
    x, y, z, T = vars
    eq1 = (x - S1_x)**2 + (y - S1_y)**2 + (z - S1_z)**2 - (v * T)**2
    eq2 = (x - S2_x)**2 + (y - S2_y)**2 + (z - S2_z)**2 - (v * (T + t12))**2
    eq3 = (x - S3_x)**2 + (y - S3_y)**2 + (z - S3_z)**2 - (v * (T + t13))**2
    eq4 = (x - S4_x)**2 + (y - S4_y)**2 + (z - S4_z)**2 - (v * (T + t14))**2
    return [eq1, eq2, eq3, eq4]
```

```
x, y, z, T = fsolve(equations, (4, 2, 2, 0))
```

```
print(x, y, z, T)
```

```
6.350001345307637  1.279997490725724  2.0499988528520467  0.0009614668477209652
    x                y                z                T
```

Process finished with exit code 0

```
library(nleqslv)
```

```
dslnex <- function(x, S1_x = 6, S1_y = 0, S1_z = 1.75, S2_x = 6.75, S2_y = 0, S2_z = 2.5, S3_x = 8,
S3_y = 1, S3_z = 2.0, S4_x = 8, S4_y = 0.75, S4_z = 1.5,
v = 1415, t12 = 3.82006E-05, t13 = 0.000221808, t14 = 0.000323488)
```

```
{
  y <- numeric(4)
  y[1] <- (S1_x - x[1])^2 + (S1_y - x[2])^2 + (S1_z - x[3])^2 - (v*x[4])^2
  y[2] <- (S2_x - x[1])^2 + (S2_y - x[2])^2 + (S2_z - x[3])^2 - (v*(x[4]+t12))^2
  y[3] <- (S3_x - x[1])^2 + (S3_y - x[2])^2 + (S3_z - x[3])^2 - (v*(x[4]+t13))^2
  y[4] <- (S4_x - x[1])^2 + (S4_y - x[2])^2 + (S4_z - x[3])^2 - (v*(x[4]+t14))^2
  y
}
```

```
xstart <- c(4,2,2,0)
```

```
fstart <- dslnex(xstart)
```

```
nleqslv(xstart, dslnex, control=list(trace=1,btol=.01,delta="newton"))
```

```
$x
```

```
[1] 6.3500013453  1.2799974907  2.0499988529  0.0009614668
```

x

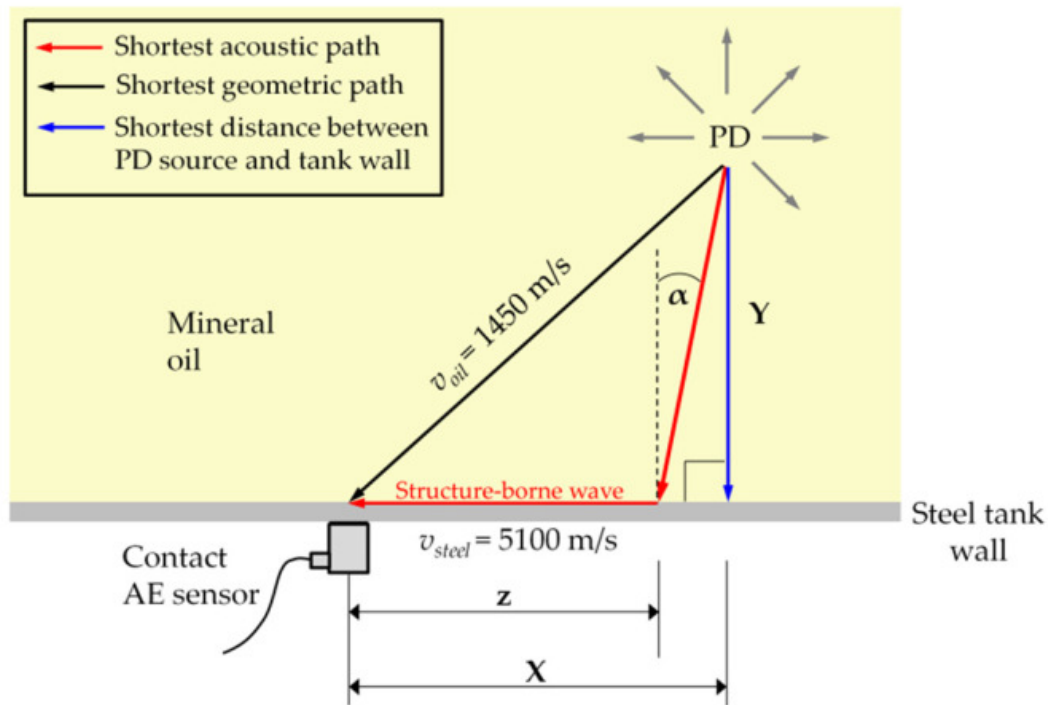
y

z

T



Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)



Czas propagacji fali akustycznej po najkrótszej drodze geometrycznej:

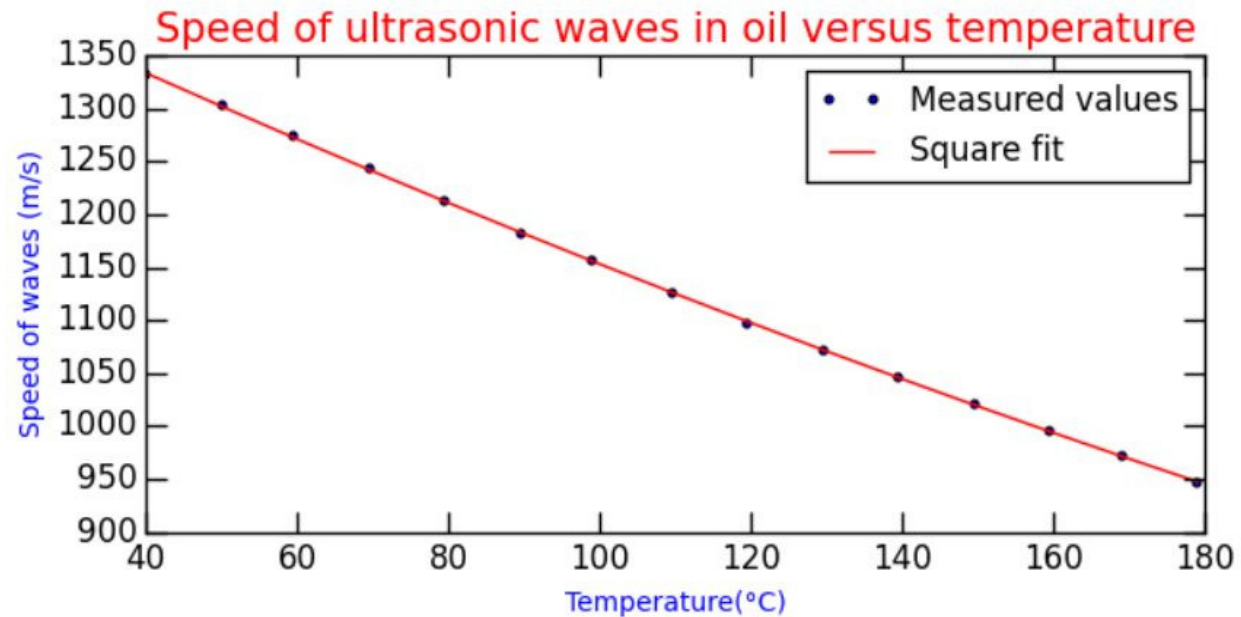
$$t = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{v_{oil}}$$

Czas propagacji fali akustycznej po **najkrótszej drodze akustycznej**:

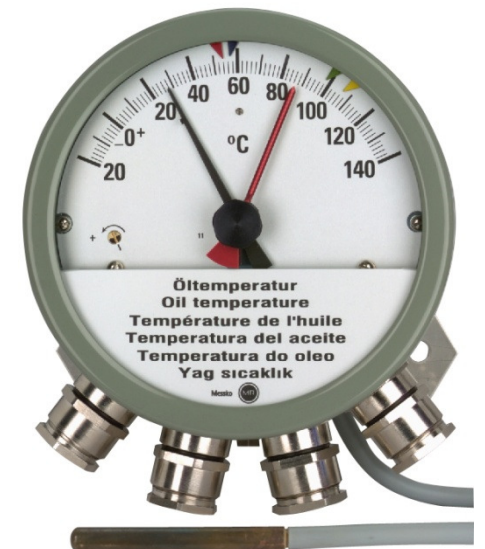
$$t = \frac{Y}{v_{oil} \cos \alpha} + \frac{X - Y \tan \alpha}{v_{steel}}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{v_{oil}}{v_{steel}} \right)$$

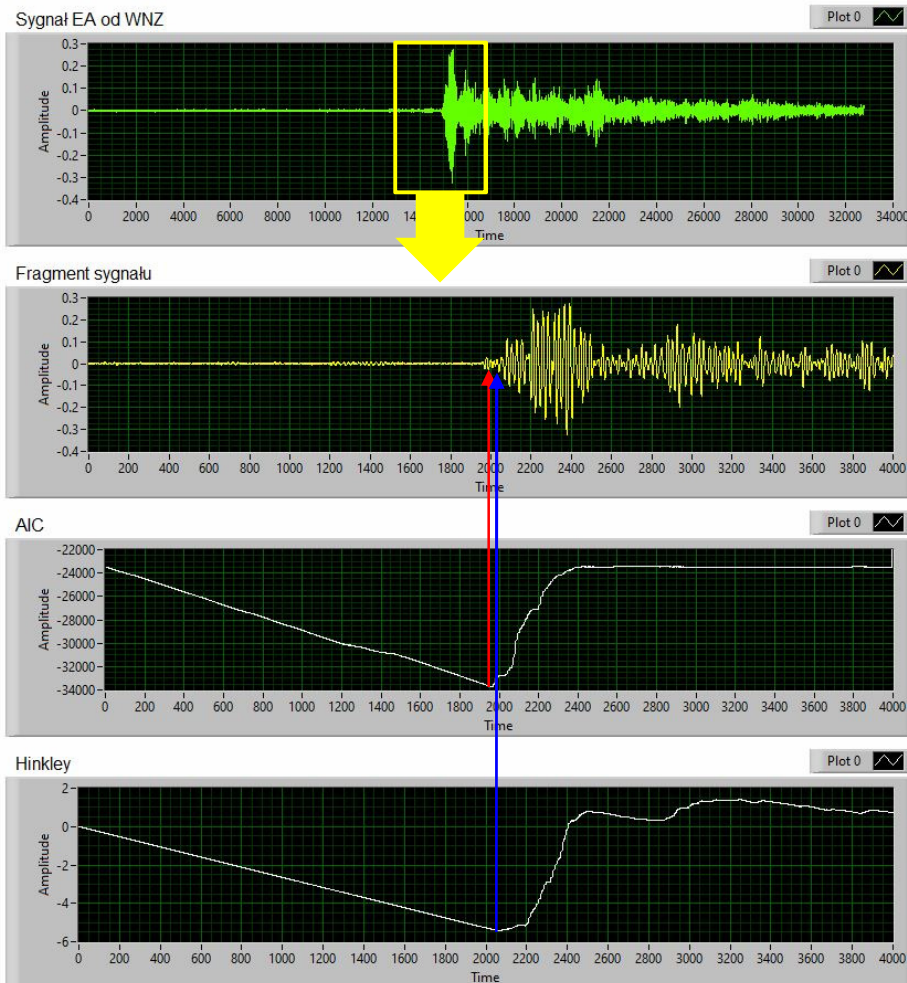
Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)



Cadot, C., Saillant, J. F., & Dulmet, B. (2016). Method for acoustic characterization of materials in temperature. In *Proceedings of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing*.



Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)



Automatyczne wyznaczanie początku sygnału:

- > Kryterium informacyjne Akaikego (AIC)
- > Kryterium energetyczne Hinkley'a

$$AIC_k = k \cdot \ln(\sigma_{1,k}^2) + (N - k - 1) \cdot \ln(\sigma_{k+1,N}^2)$$

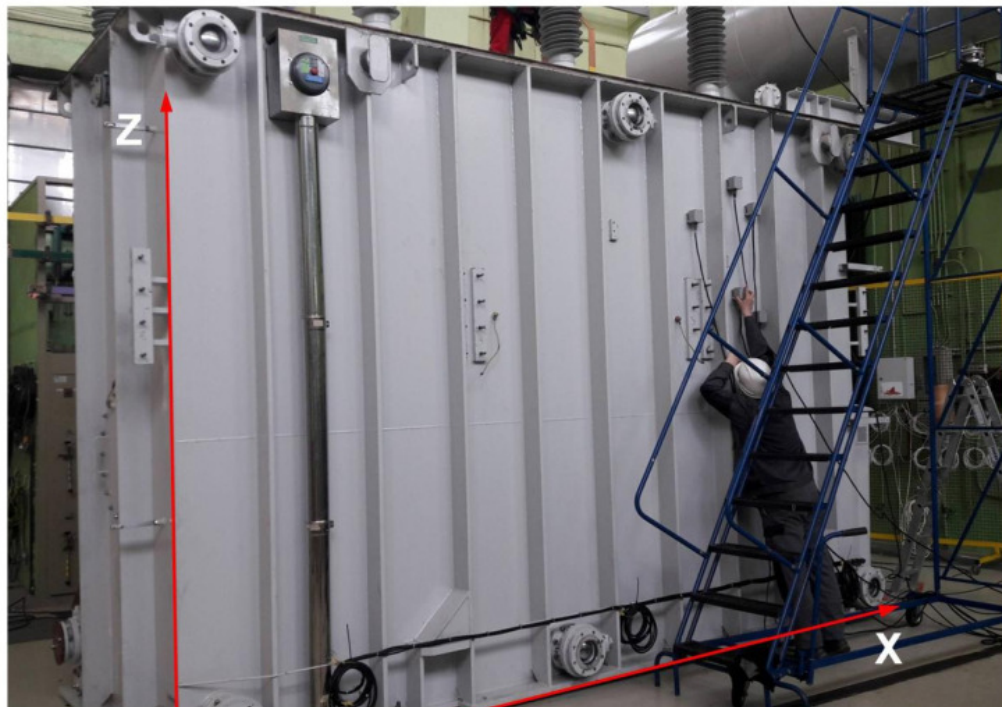
k – numer aktualnej próbki, N – liczba próbek, σ^2 - wariancja

$$EC_k = \sum_{i=1}^k x_i^2 - k \cdot P_x$$

k – numer aktualnej próbki, x_i – wartość i-tej próbki, P_x – średnia moc sygnału

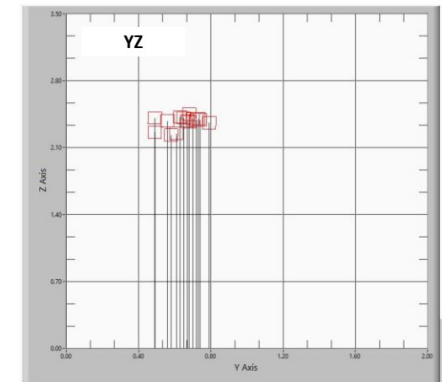
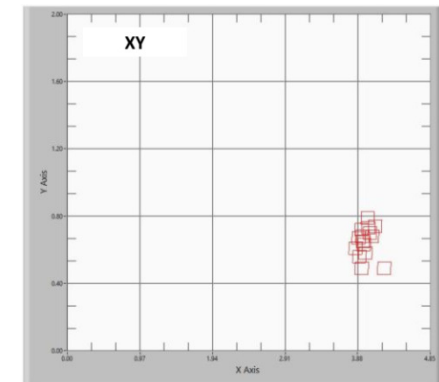
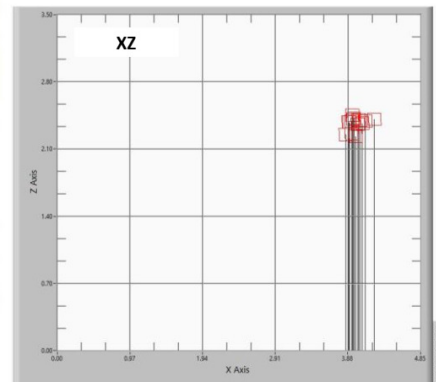
Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 1



(0, 0, 0)

Przetwornik	Konfiguracja I		
	Współrzędne przetworników		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
CH0	3.67	0	2.98
CH1	3.28	0	2.73
CH2	3.82	0	2.83
CH3	4.85	0.27	2.93



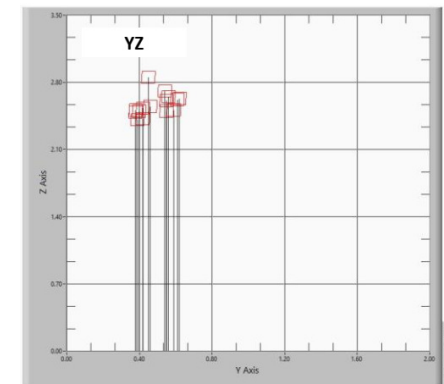
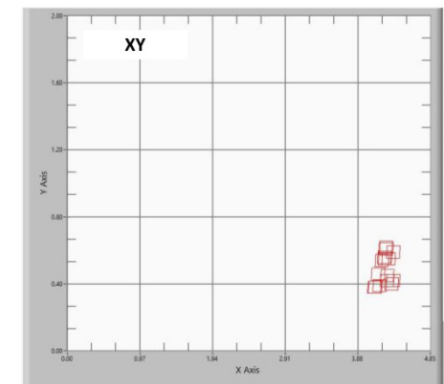
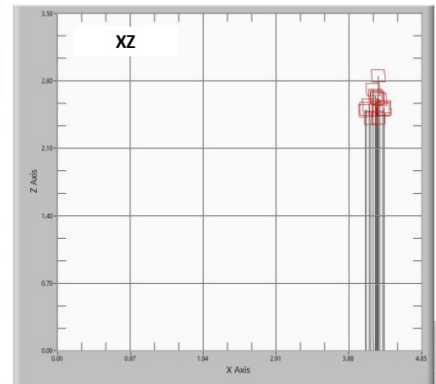
Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 1



(0, 0, 0)

Przetwornik	Konfiguracja II		
	Współrzędne przetworników		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
CH0	4.15	0	2.82
CH1	4.30	0	2.49
CH2	4.85	0.30	2.21
CH3	4.85	0.27	2.93



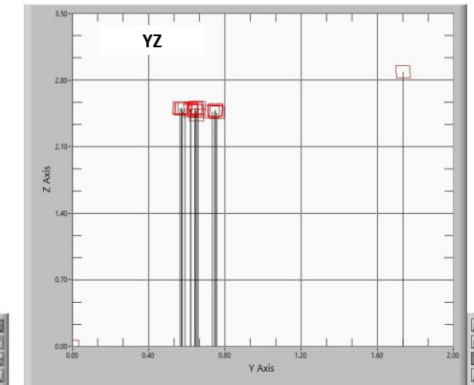
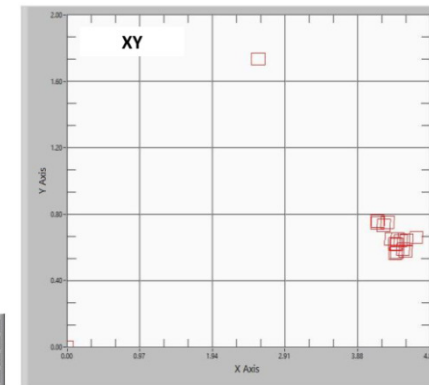
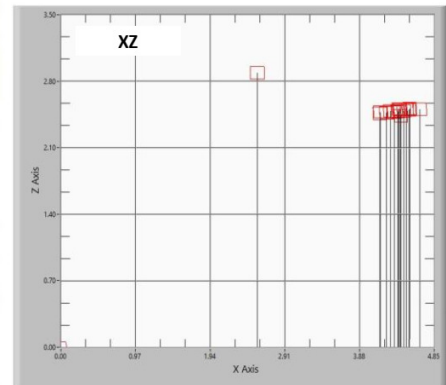
Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 1



(0, 0, 0)

Przetwornik	Konfiguracja III		
	Współrzędne przetworników		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
CH0	4.85	0.95	2.83
CH1	4.85	0.64	2.60
CH2	4.85	0.30	2.21
CH3	4.85	0.27	2.93



Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 1



(0, 0, 0)

Konfiguracja I

- X – od **3.85** m do **4.23** m
- Y – od **0.49** m do **0.79** m
- Z – od **2.23** m do **2.45** m

Konfiguracja II

- X – od **4.10** m do **4.35** m
- Y – od **0.38** m do **0.61** m
- Z – od **2.49** m do **2.85** m

Konfiguracja III

- X – od **4.14** m do **4.52** m
- Y – od **0.56** m do **0.76** m
- Z – od **2.43** m do **2.51** m

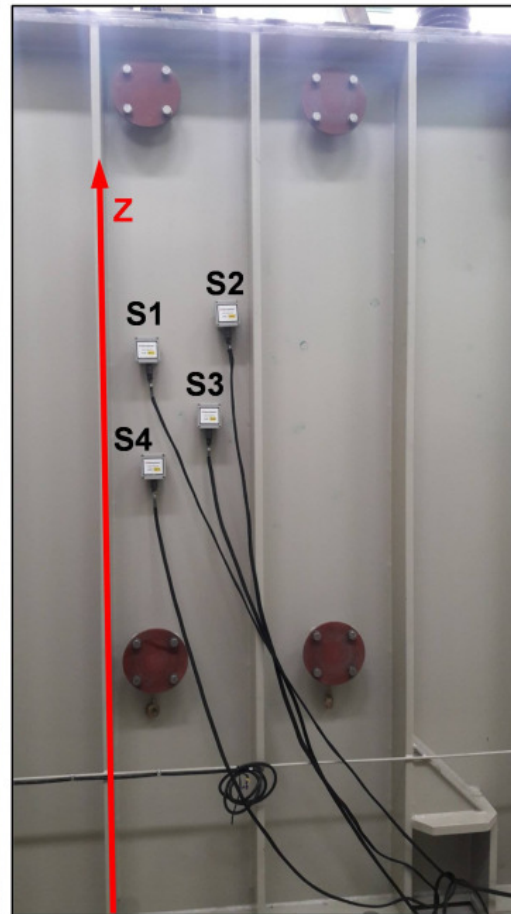
Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 2

Konfiguracja I



Konfiguracja II

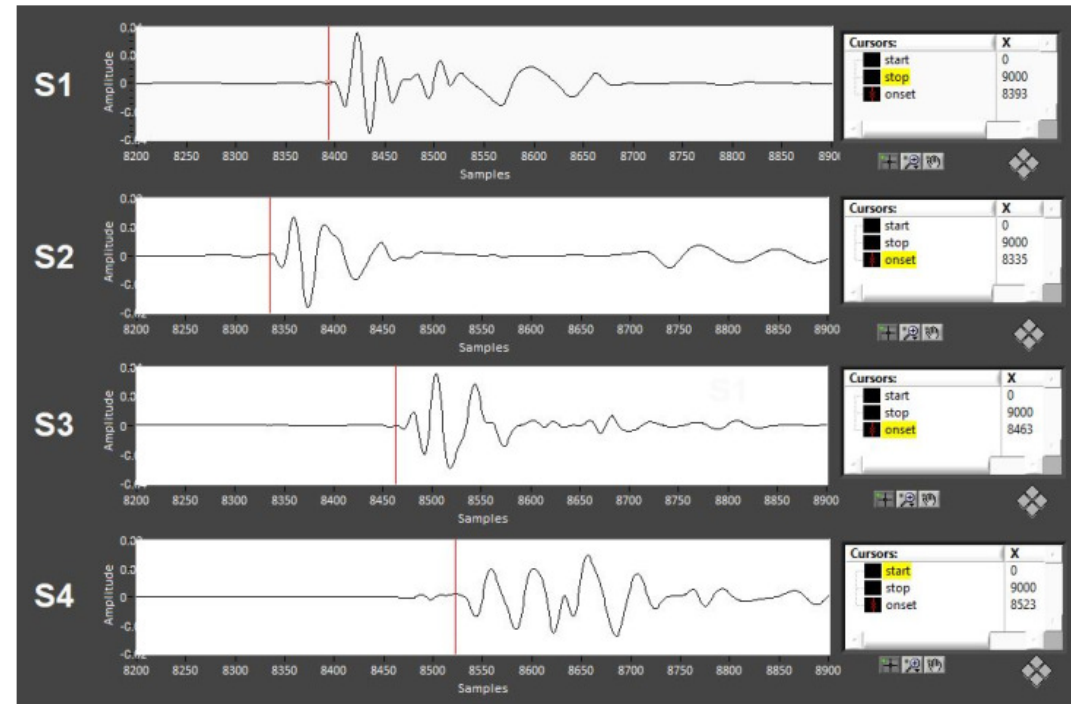


Konfiguracja I			
Przetwornik	Współrzędne przetworników		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.375	0	1.865
S2	0.52	0	1.79
S3	0.59	0	1.575
S4	0.275	0	1.685
Konfiguracja II			
Przetwornik	Współrzędne przetworników		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.12	0	1.82
S2	0.365	0	1.94
S3	0.30	0	1.62
S4	0.13	0	1.455

Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 2

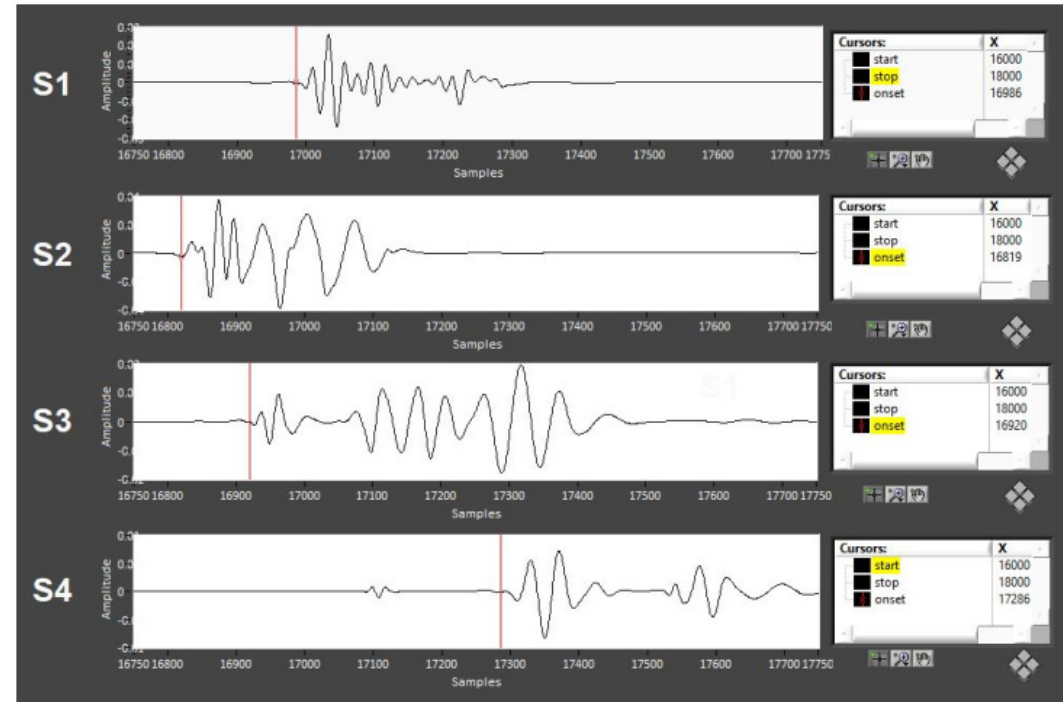
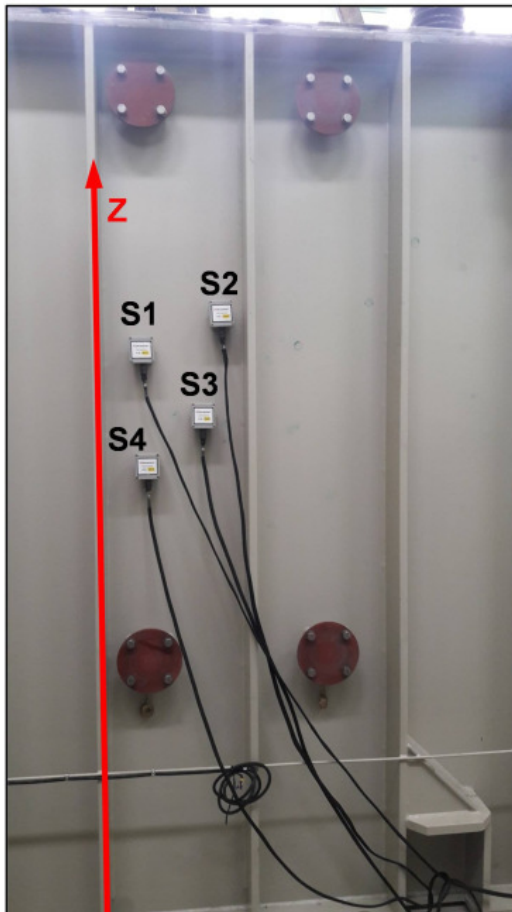
Konfiguracja I



Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 2

Konfiguracja II



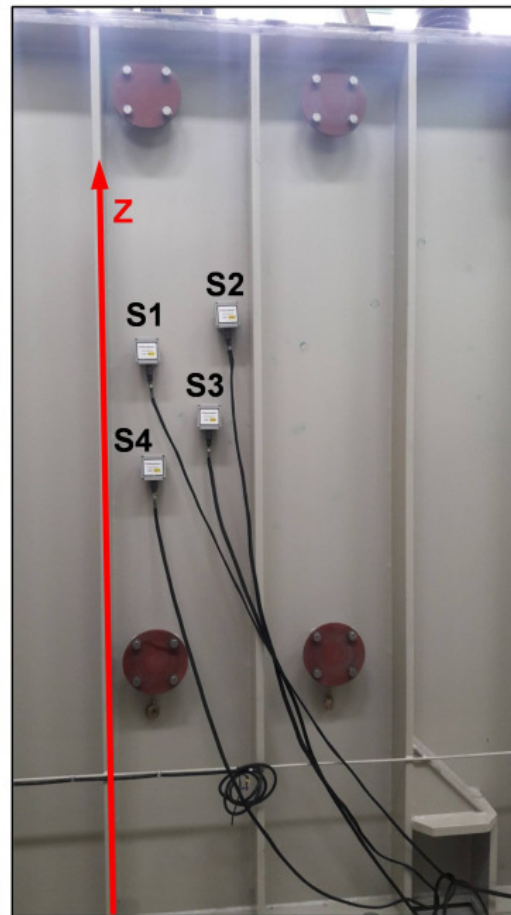
Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 2

Konfiguracja I



Konfiguracja II



Konfiguracja I

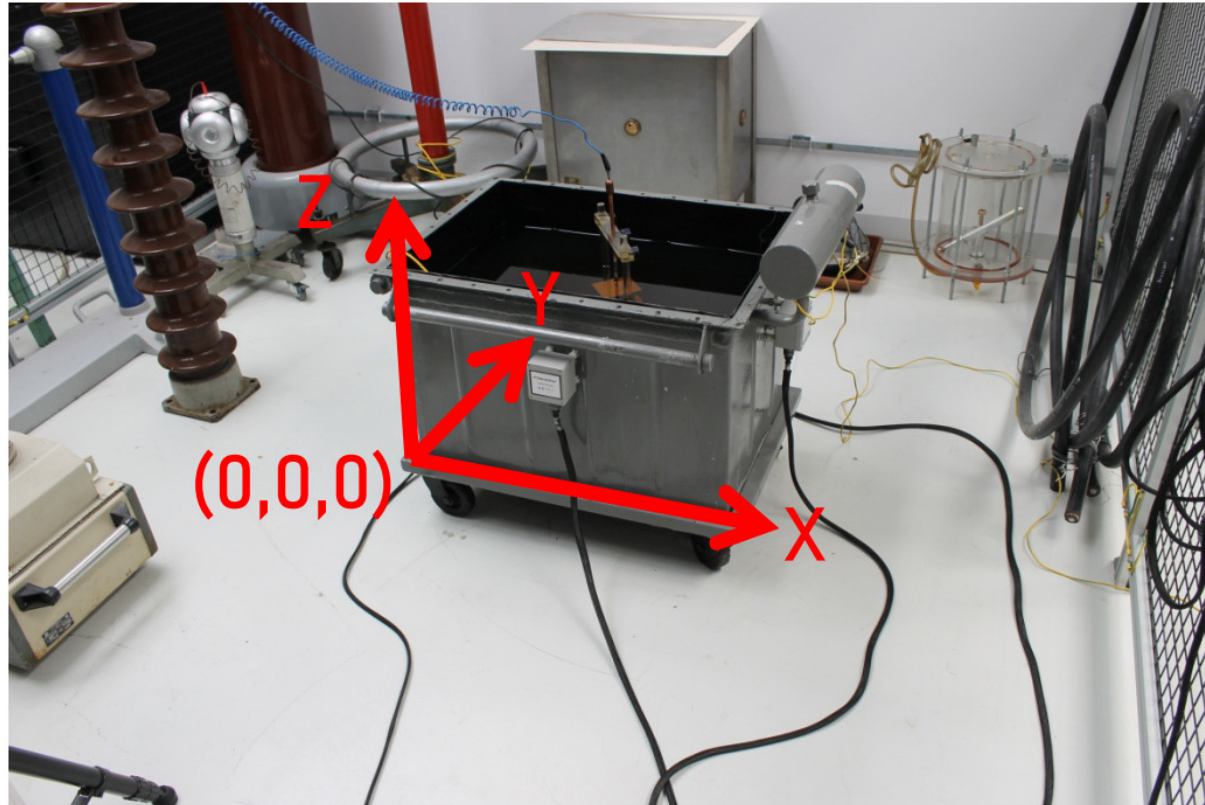
- **X** – od 35 cm do 45 cm (średnia 44 cm)
- **Y** – od 21 cm do 67 cm (średnia 37 cm)
- **Z** – od 182 cm do 217 cm (średnia 197 cm)

Konfiguracja II

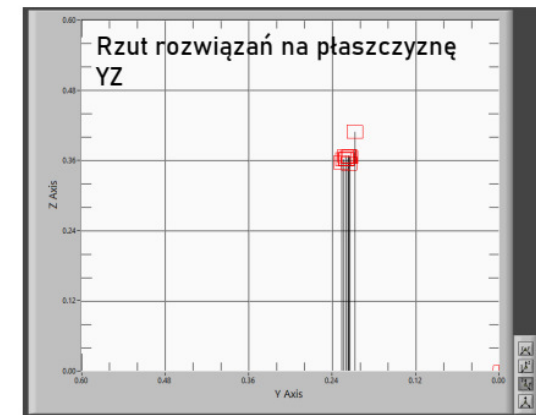
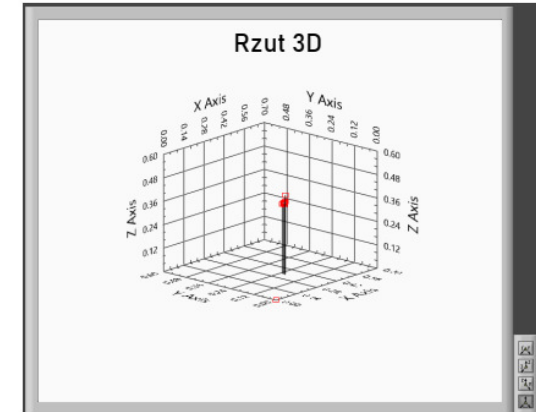
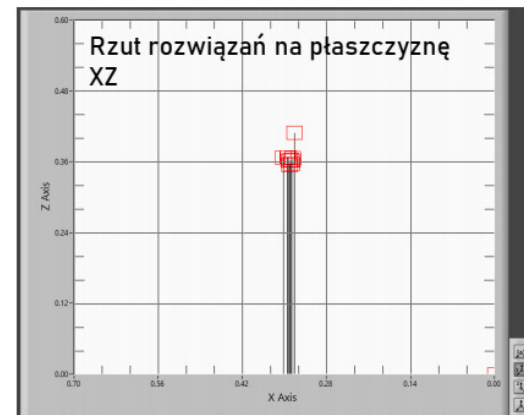
- **X** – od 58 cm do 61 cm (średnia 60 cm)
- **Y** – od 35 cm do 48 cm (średnia 42 cm)
- **Z** – od 189 cm do 195 cm (średnia 191 cm)

Metoda trilateracyjna, TDoA (ang. Time Difference of Arrival)

Przykład 3



Model laboratoryjny kadzi transformatora



>>> Standardowa i zaawansowana technika osłuchowa <<<

Standardowa technika osłuchowa

Standardowa technika osłuchowa polega na zlokalizowaniu punktów na kadzi transformatora, w którym rejestrowane sygnały emisji akustycznej mają podwyższoną amplitudę (inne nazwy metody: metoda największej głośności, metoda amplitudowa).





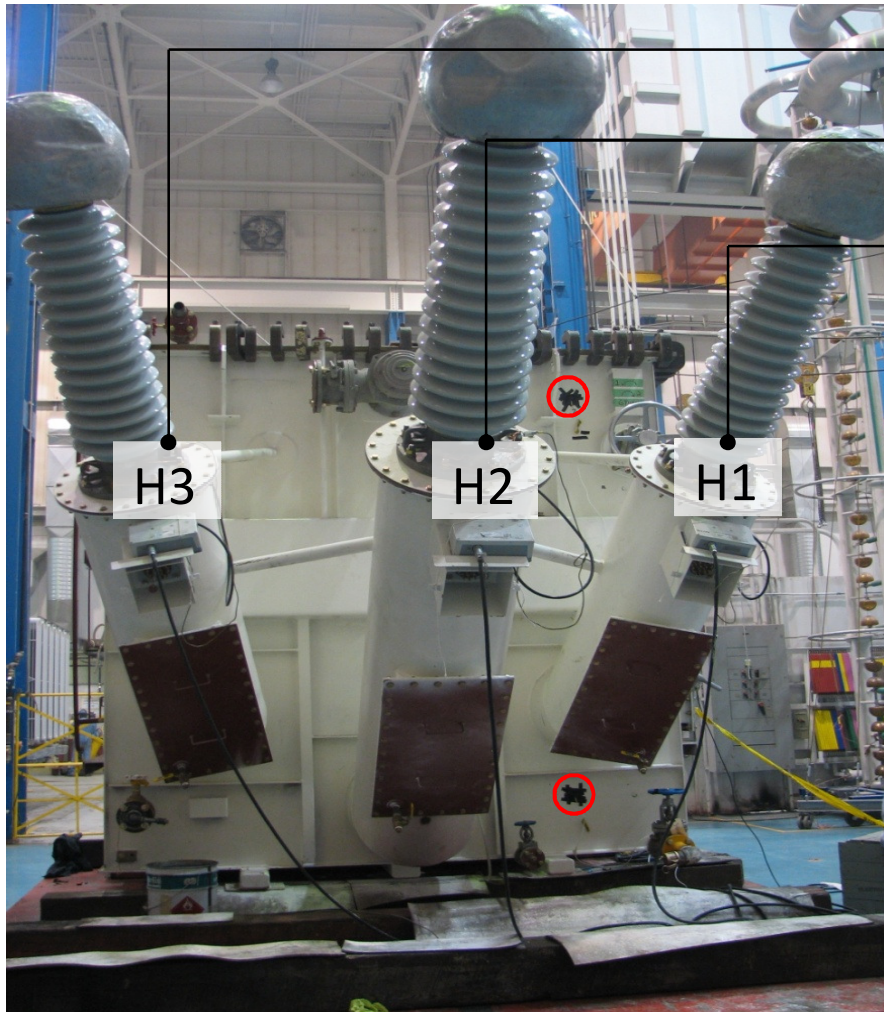
Standardowa technika osłuchowa

Przykład 1



Standardowa technika osłuchowa

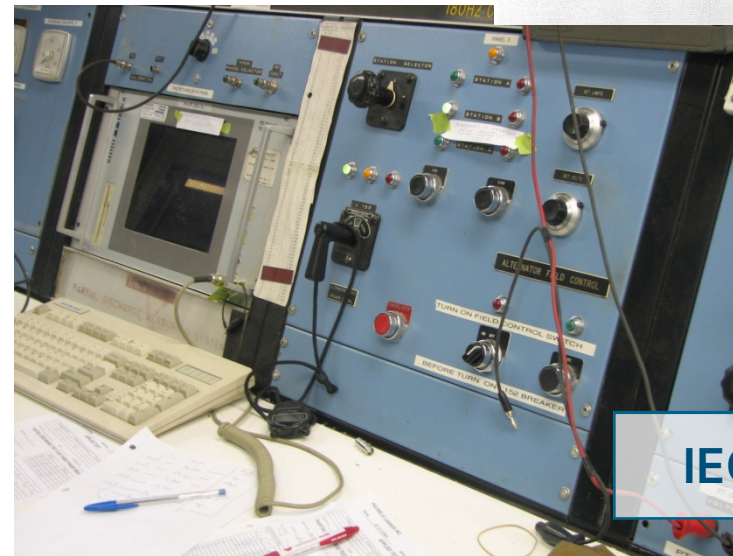
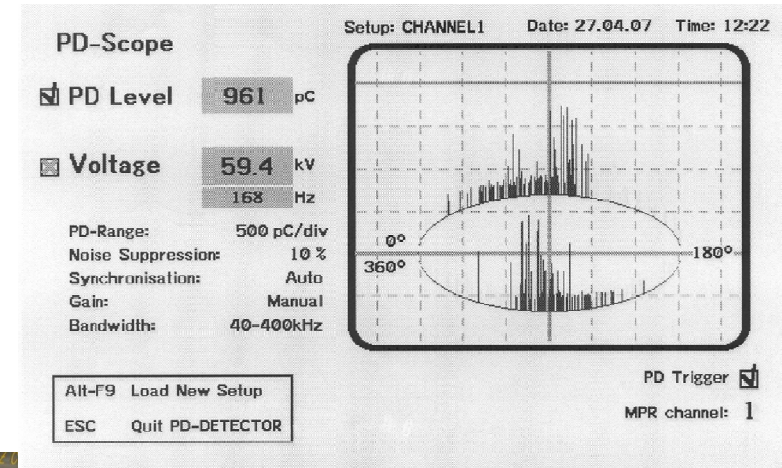
Przykład 1



<100 pC

<100 pC

800-1000 pC

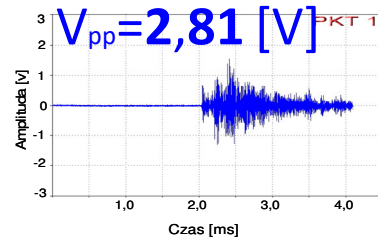


IEC-60270

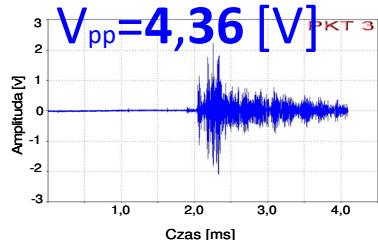
Standardowa technika osłuchowa

Przykład 1

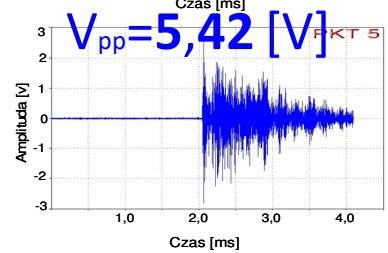
1



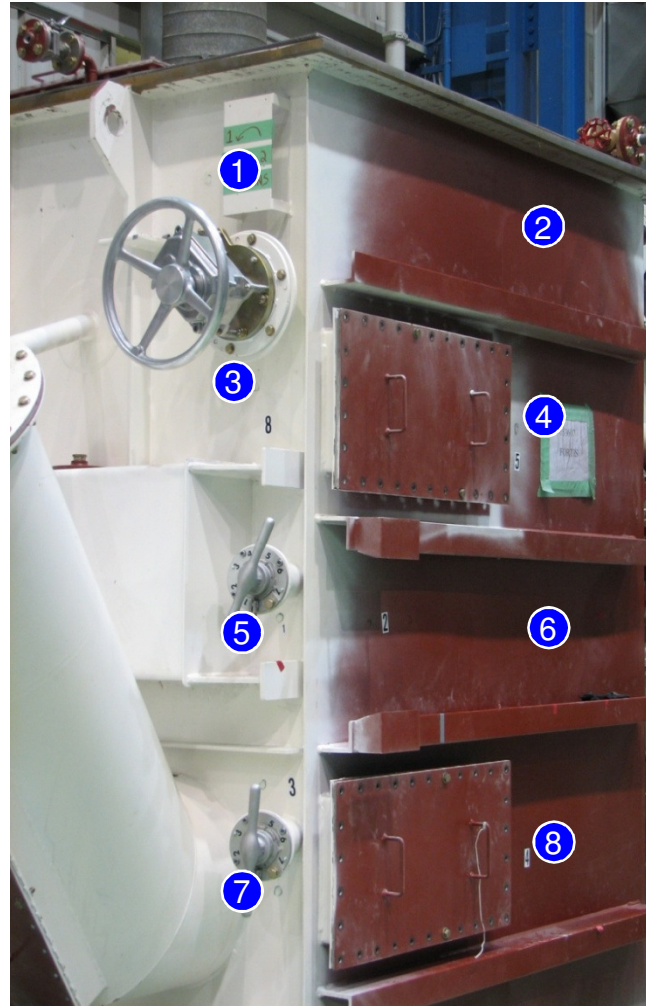
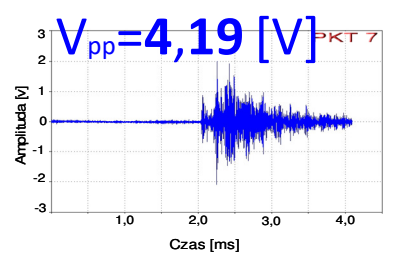
3



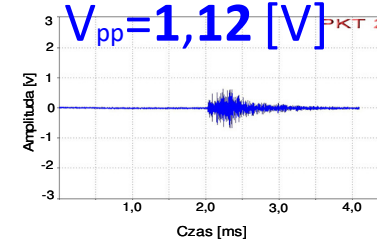
5



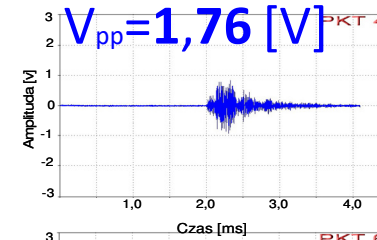
7



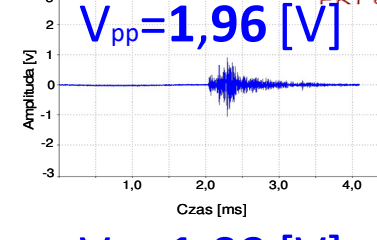
2



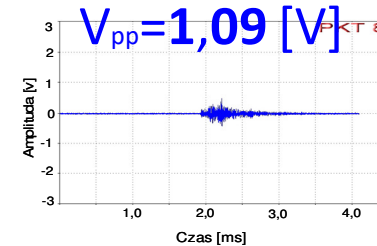
4



6

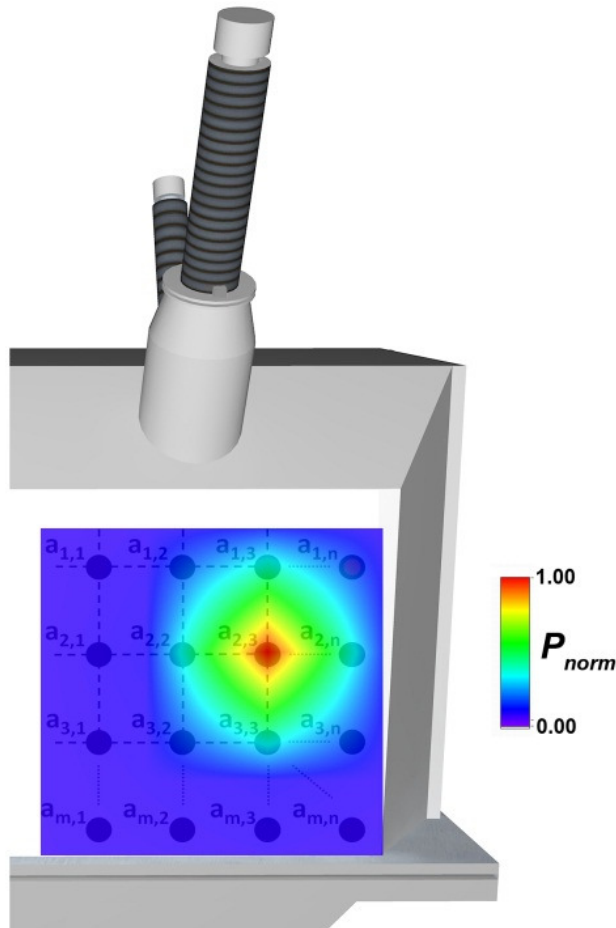


8



Standardowa technika osłuchowa

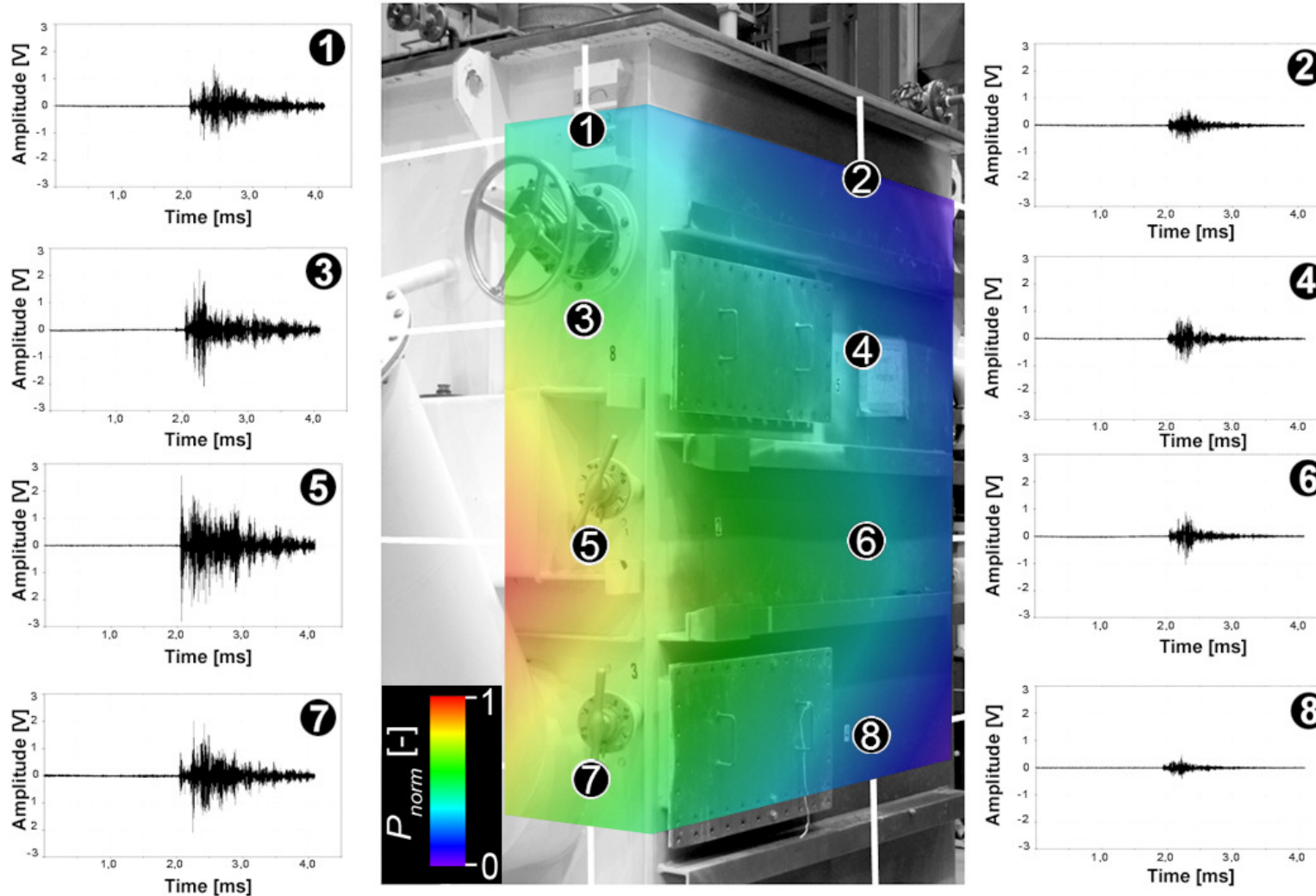
Przykład 1



Mapa emisji akustycznej – graficzna metoda wizualizacji wyniku pomiaru techniką osłuchową. Powstaje w efekcie interpolacji wartości amplitud EA zmierzonych we wszystkich punktach siatki pomiarowej. Obraz mapy akustycznej jest nakładany na zdjęcie kadzi badanego transformatora.

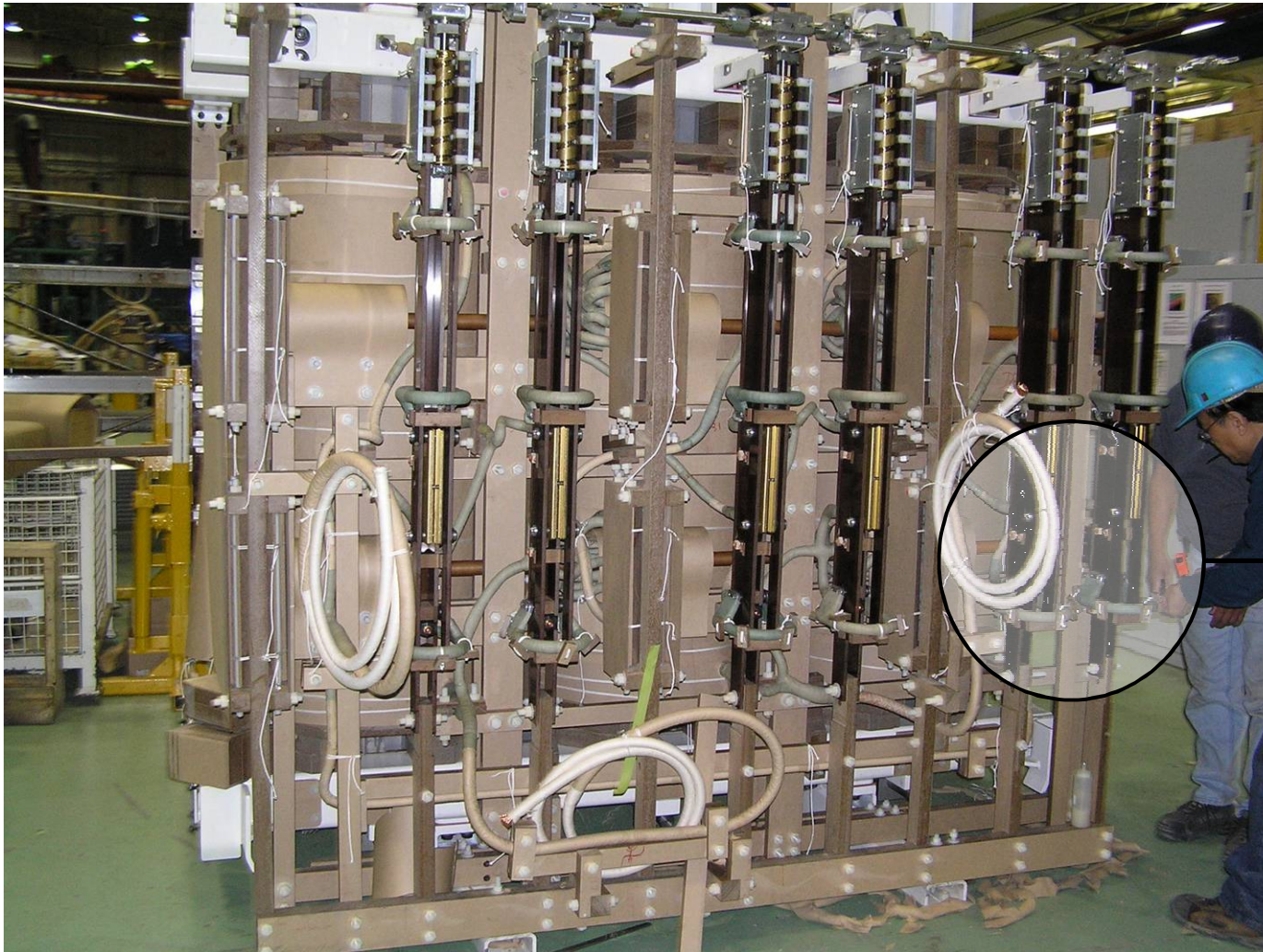
Standardowa technika osłuchowa

Przykład 1



Standardowa technika osłuchowa

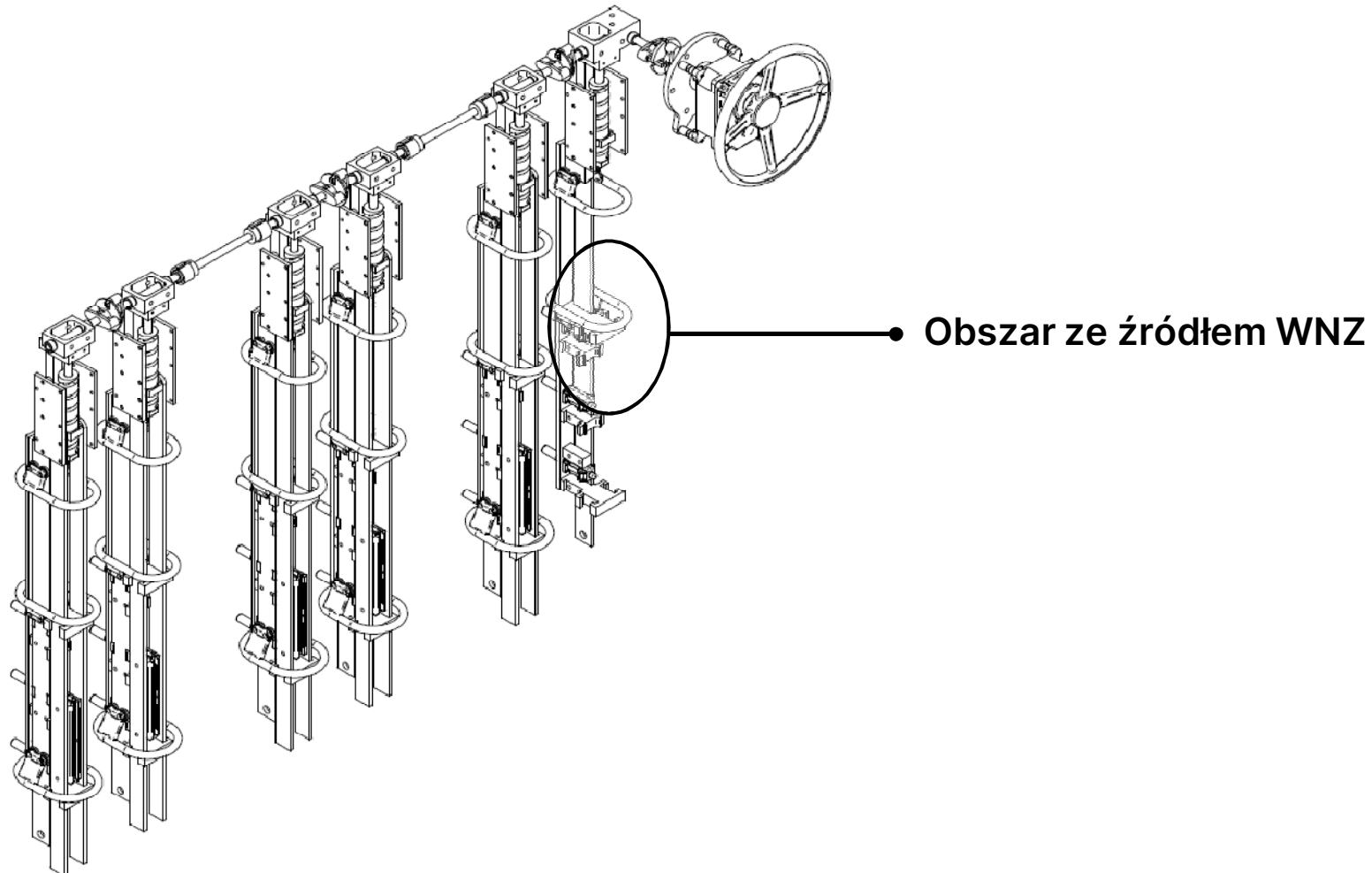
Przykład 1



● Obszar ze źródłem WNZ

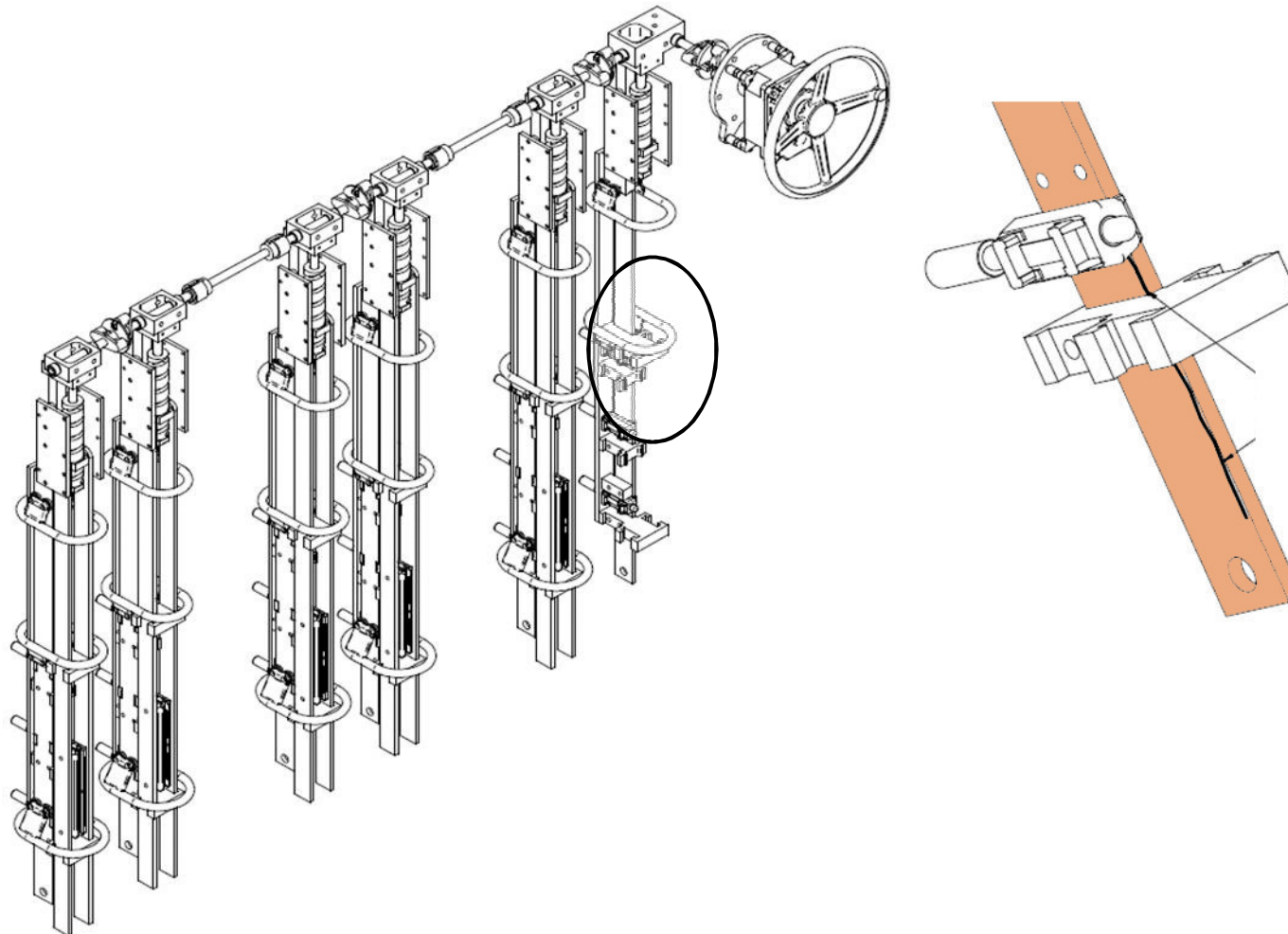
Standardowa technika osłuchowa

Przykład 1



Standardowa technika osłuchowa

Przykład 1



Wyładowania powierzchniowe
wzdłuż wykonanej z żywicy
fenolowej belki wsporczej
przełącznika szeregowo-
równoległego



Standardowa technika osłuchowa

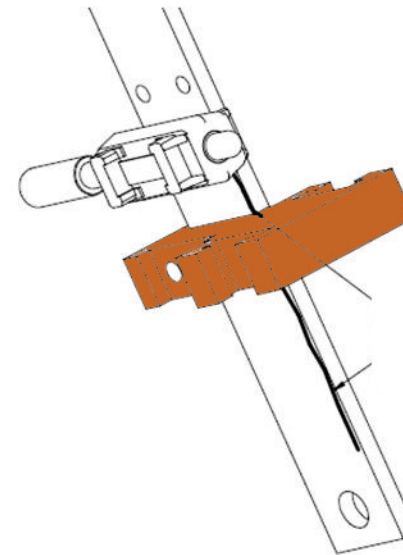
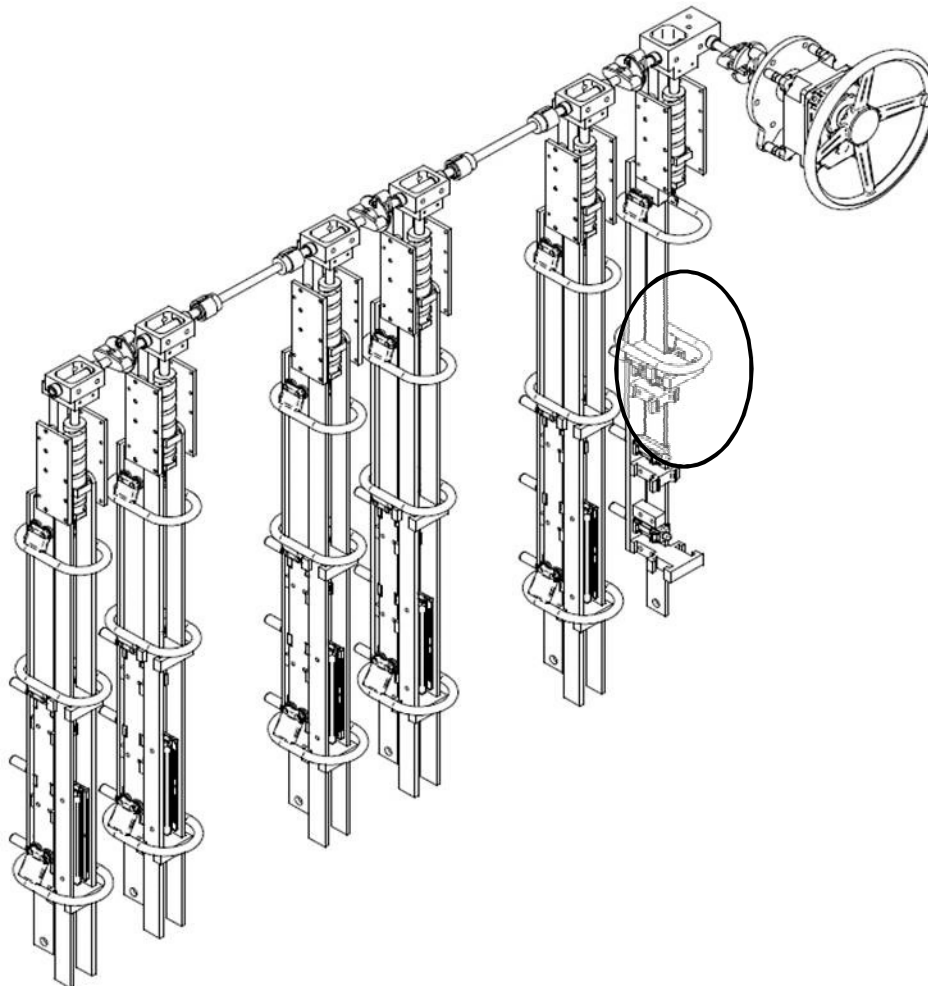
Przykład 1



Wyładowania ślizgowe wzdłuż belki wsporczej
(żywica fenolowa) przetwornika szeregowo-równoległego

Standardowa technika osłuchowa

Przykład 1



Belka prespanowa mocują
przełącznik szeregowo-
równoległy



Standardowa technika osłuchowa

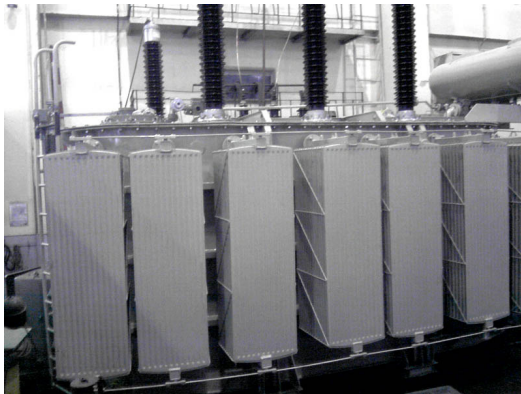
Przykład 1



Wtrącina metalowa w wewnętrznych warstwach belki preszpanowej

Standardowa technika osłuchowa

Przykład 2

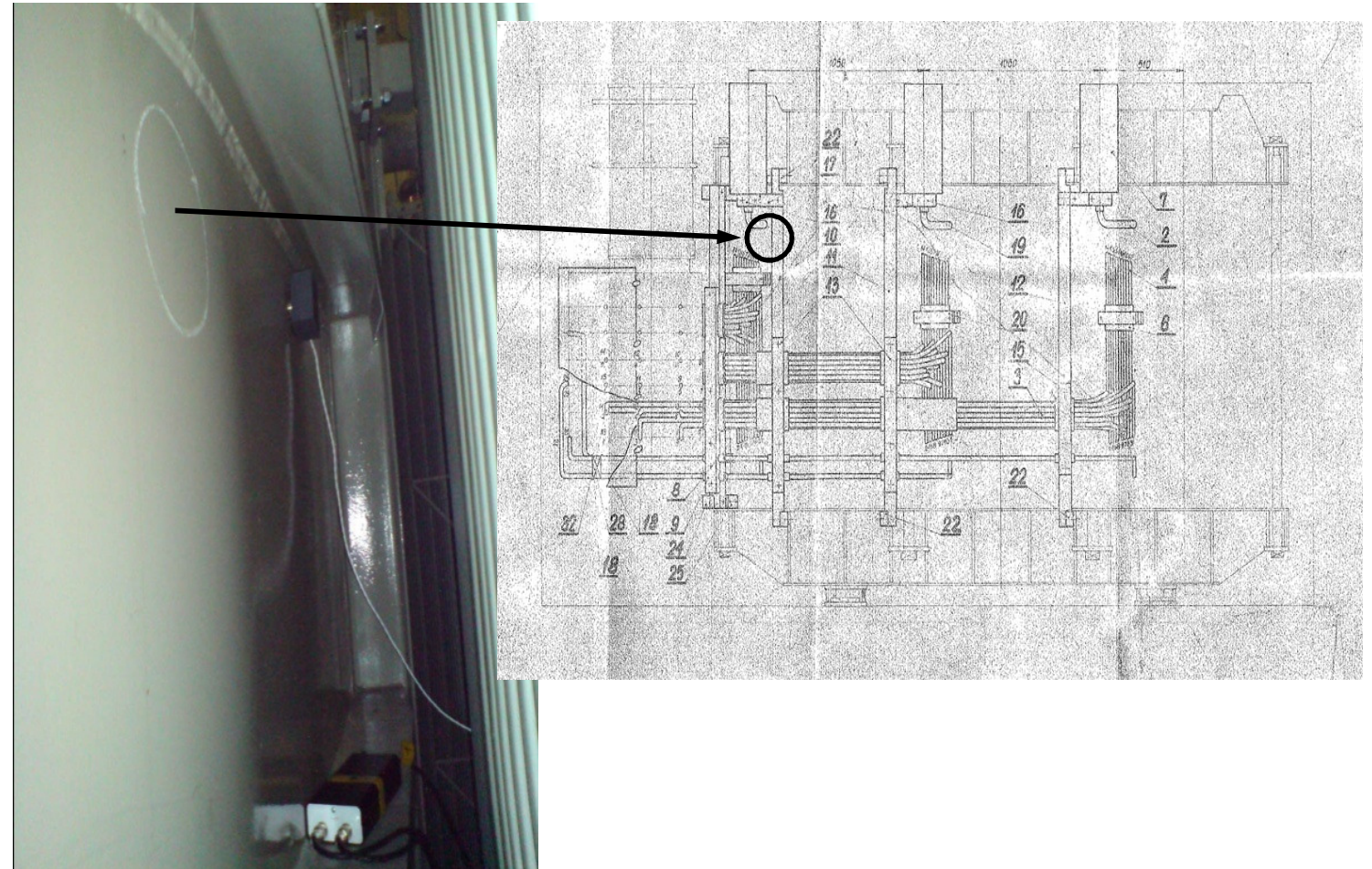
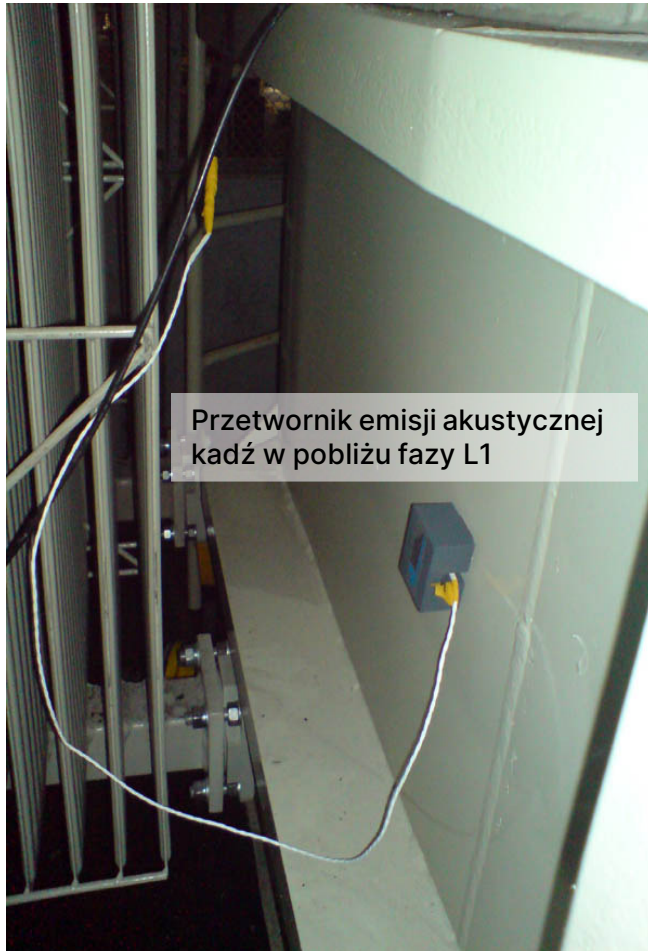


16 MVA, 115/22 kV



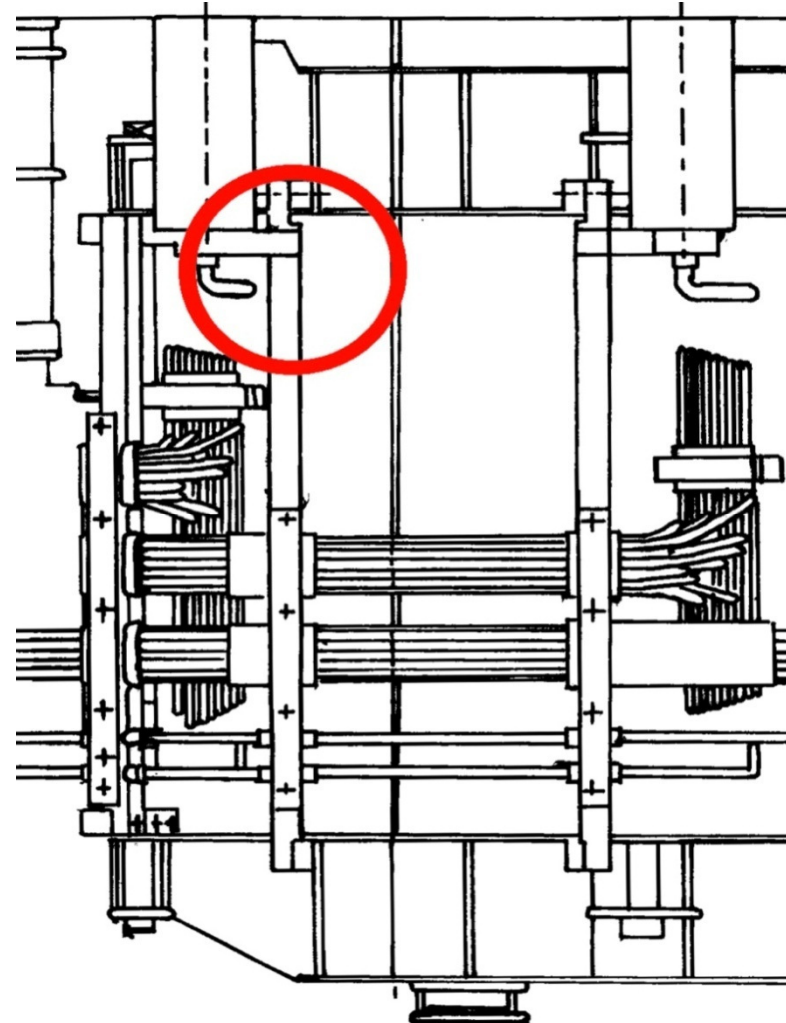
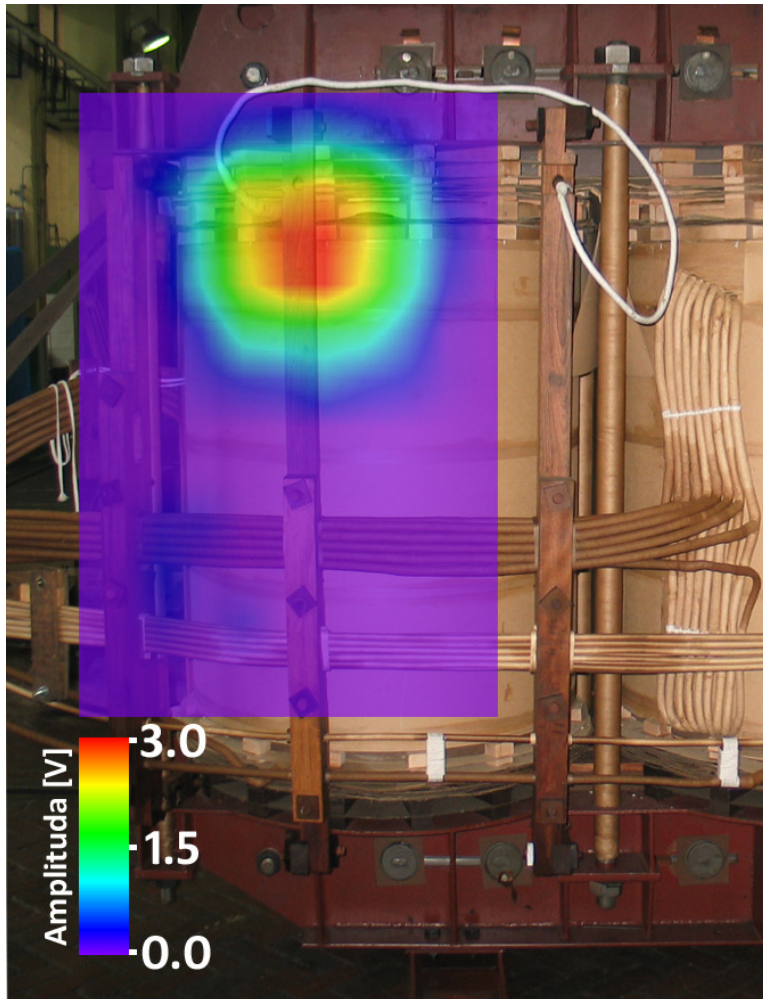
Standardowa technika osłuchowa

Przykład 2



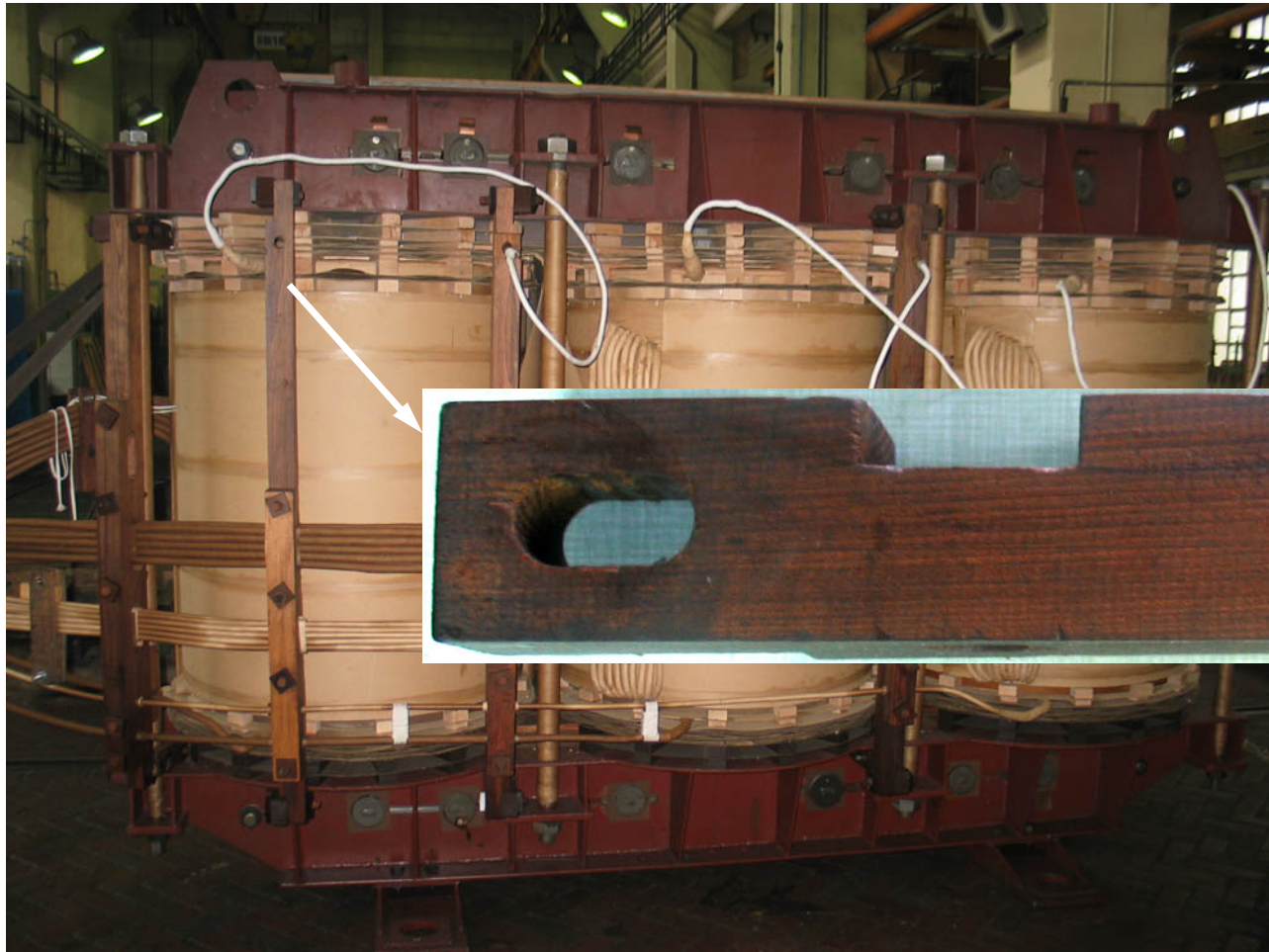
Standardowa technika osłuchowa

Przykład 2



Standardowa technika osłuchowa

Przykład 2

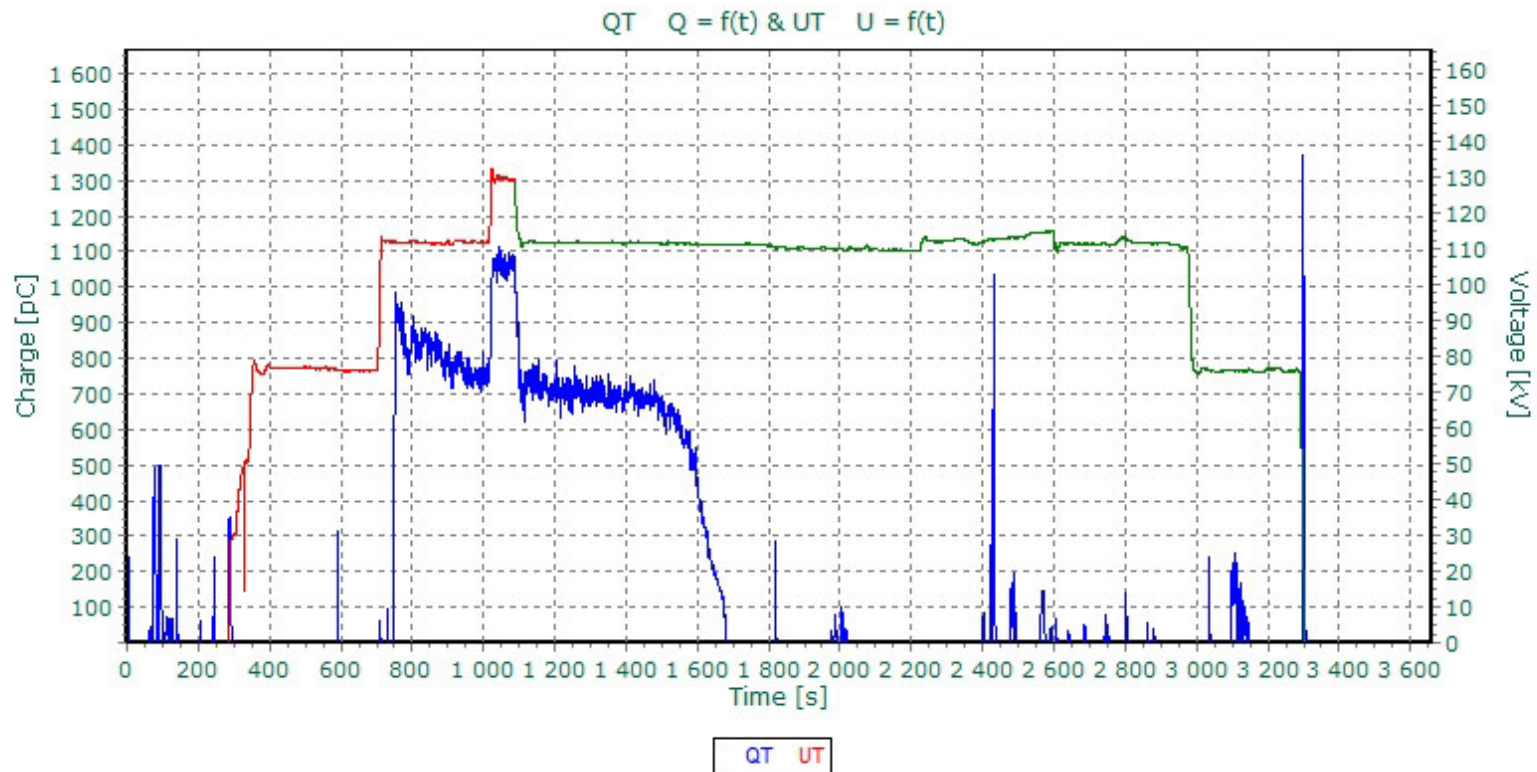


Wynik rewizji:

Ślady wyładowań powierzchniowych
na belce wsporczej odpływów uzwojenia
regulacyjnego GN

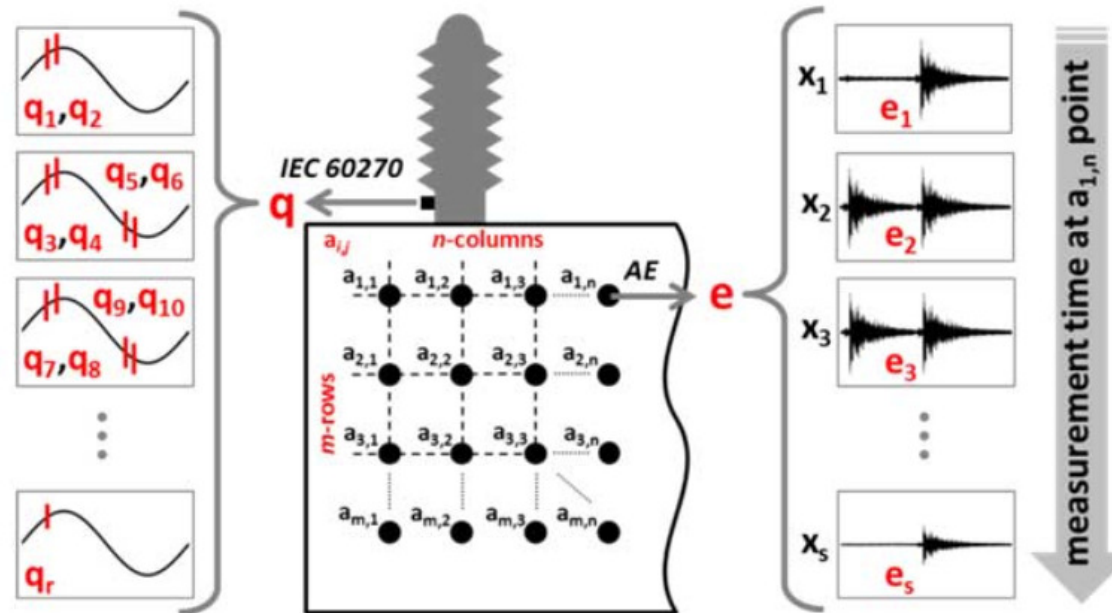
Standardowa technika osłuchowa

Przykład 2



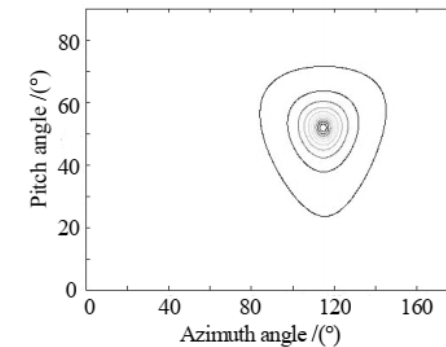
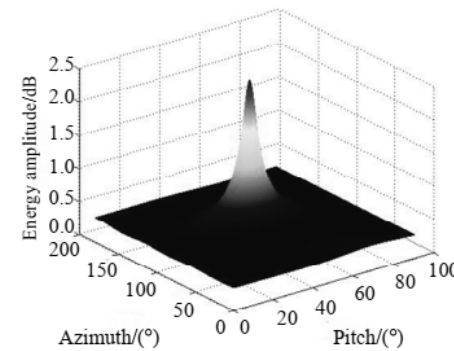
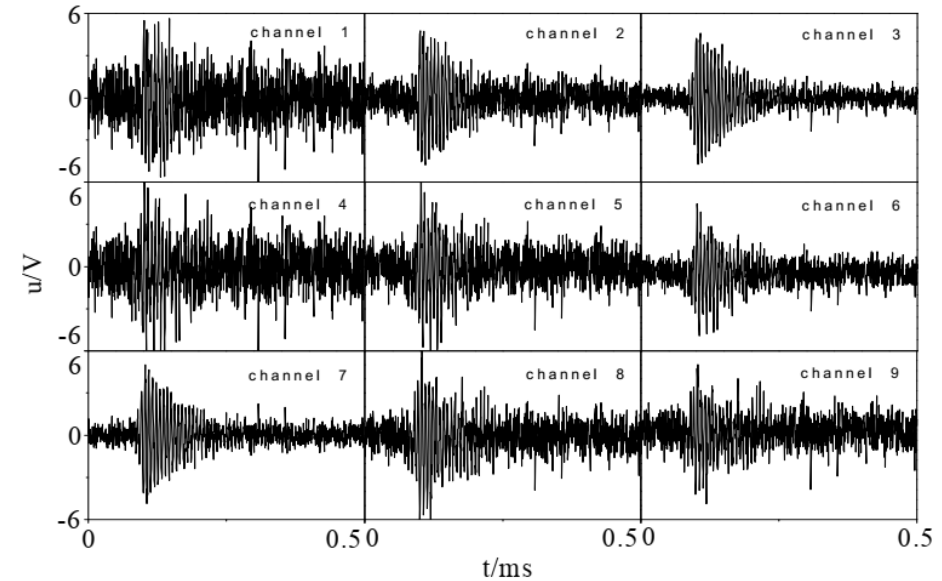
Wynik próby napięciowej z pomiarem WNZ po wymianie belki wsporczej i zwiększeniu odległości izolacyjnych pomiędzy odplywami a kadzią transformatora

Zaawansowana technika osłuchowa

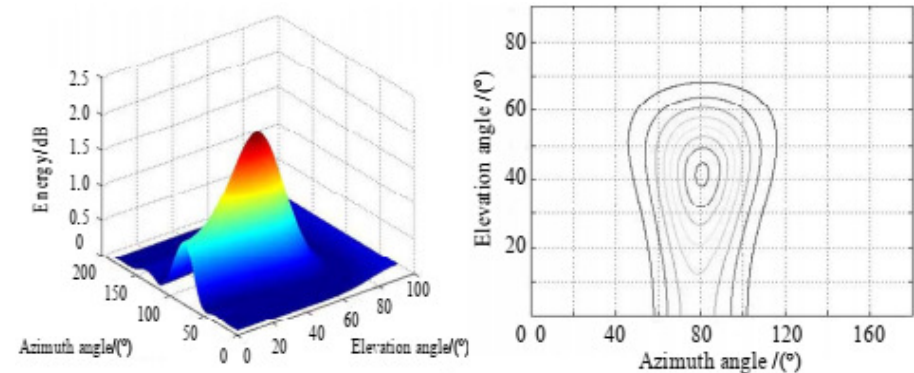
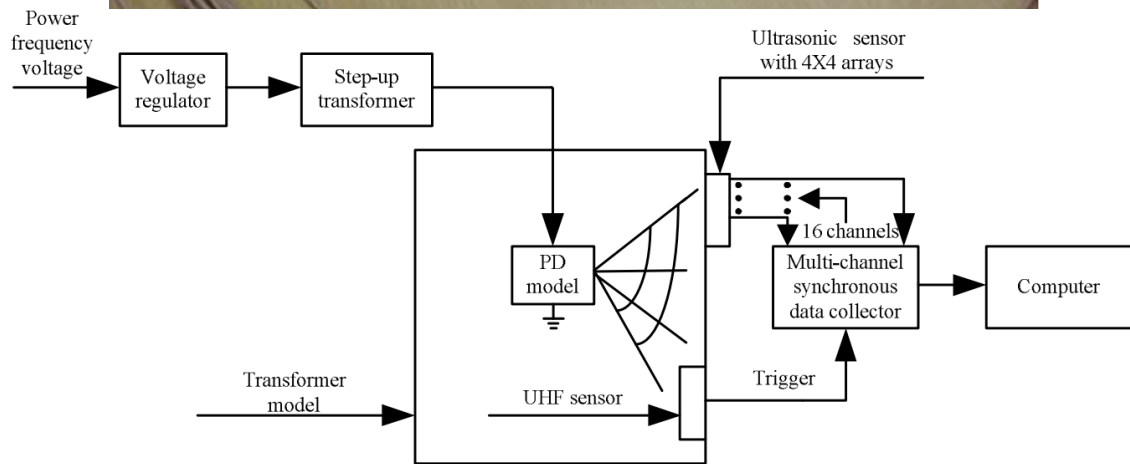
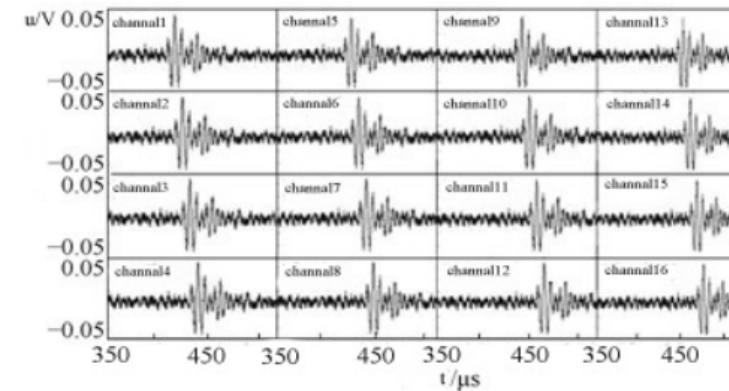


>>> Estymacja kierunku nadejścia sygnału DOA (ang. Direction of Arrival) <<<

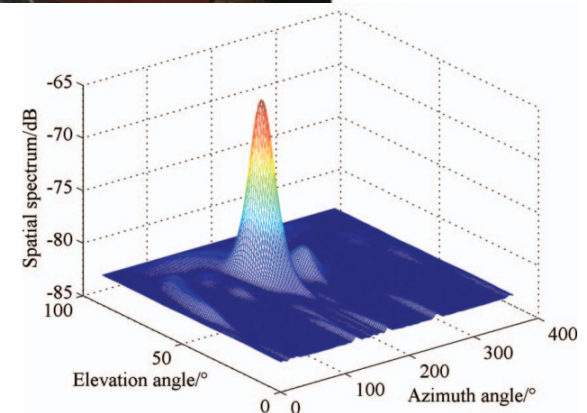
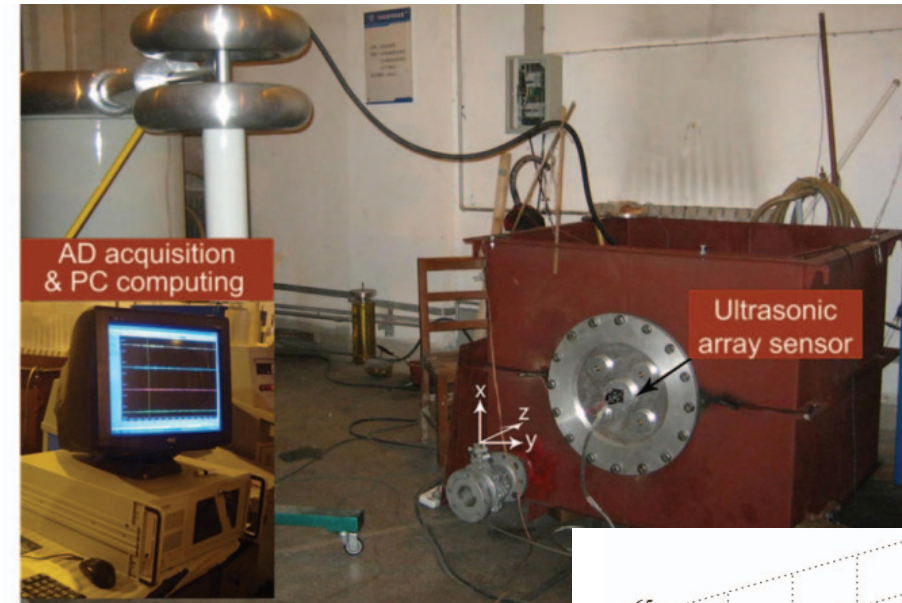
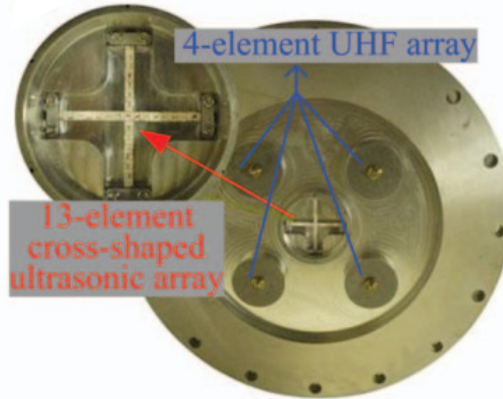
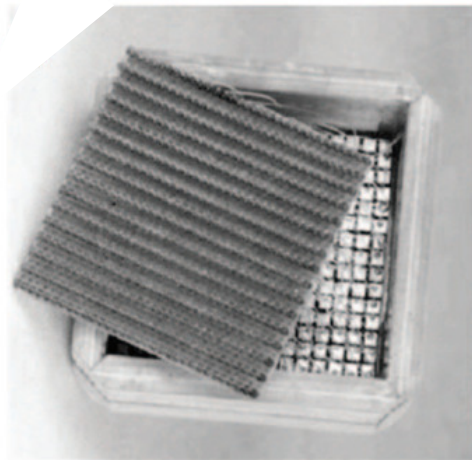
Direction of Arrival (DOA)



Direction of Arrival (DOA)



Direction of Arrival (DOA)



Li, Jisheng, et al. "Study of cross-shaped ultrasonic array sensor applied to partial discharge location in transformer oil." *Review of Scientific Instruments* 84.11 (2013): 115001

Direction of Arrival (DOA) – algorytm MUSIC (Multiple Signal Classification Method)

1. Zebranie próbek wejściowych $x(t_n), n = 1, 2, \dots, N$ i estymowanie macierzy kowariancji:

$$R_{xx} \cong \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t_n)x^H(t_n)$$

2. Przeprowadzenie dekompozycji macierzy kowariancji R_{xx}

$$R_{xx}V = V\Lambda$$

gdzie $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$. $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$ to wartości własne, a V zawiera wszystkie wektory własne R_{xx}

3. Oszacowanie wielokrotności k najmniejszych wartości własnych λ_{min} oraz liczbę sygnałów d jako $d = M - k$

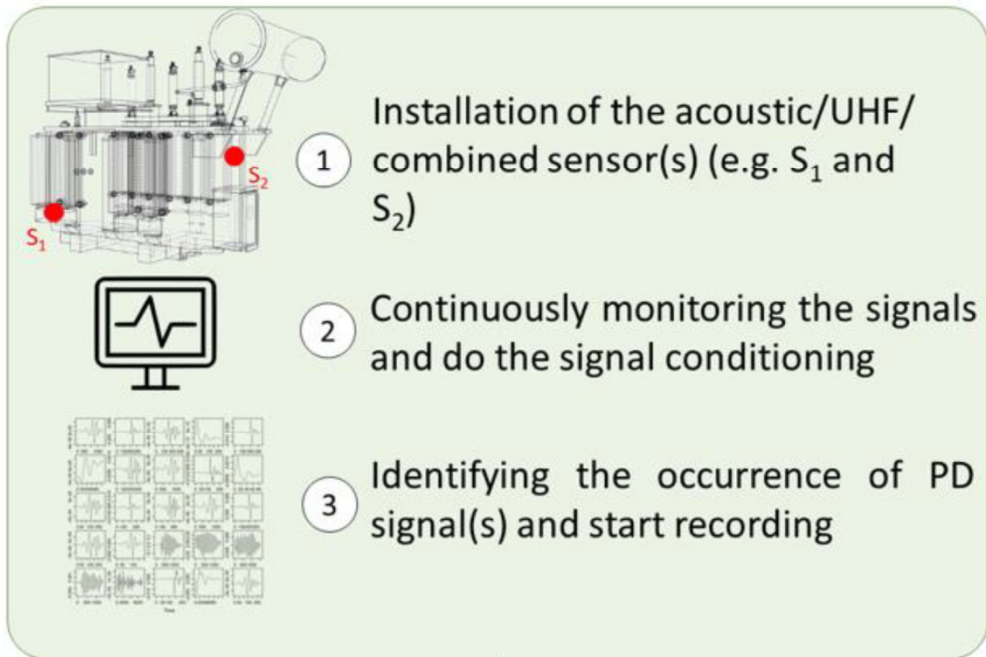
4. Obliczenie pseudowidma $P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)V_n V_n^H a(\theta)}$ gdzie $V_n = [q_{d+1}, \dots, q_M]$
a q to wektory własne odpowiadające najmniejszym wartościom własnym

5. Znalezienie d największych wartości pseudowidma $P(\theta)$, które odpowiadają estymowanym kierunkom nadejścia sygnałów.

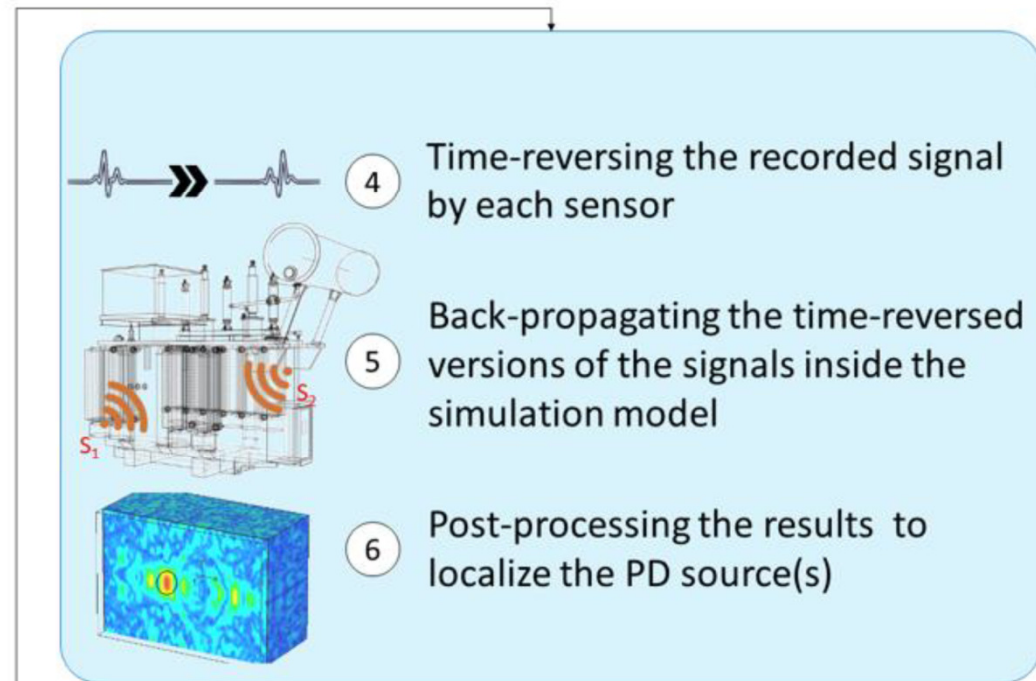
>>> Metoda „odwróconego czasu” (ang. Time Reversal Method) <<<

Time Reversal Method

Stage #1: Forward phase

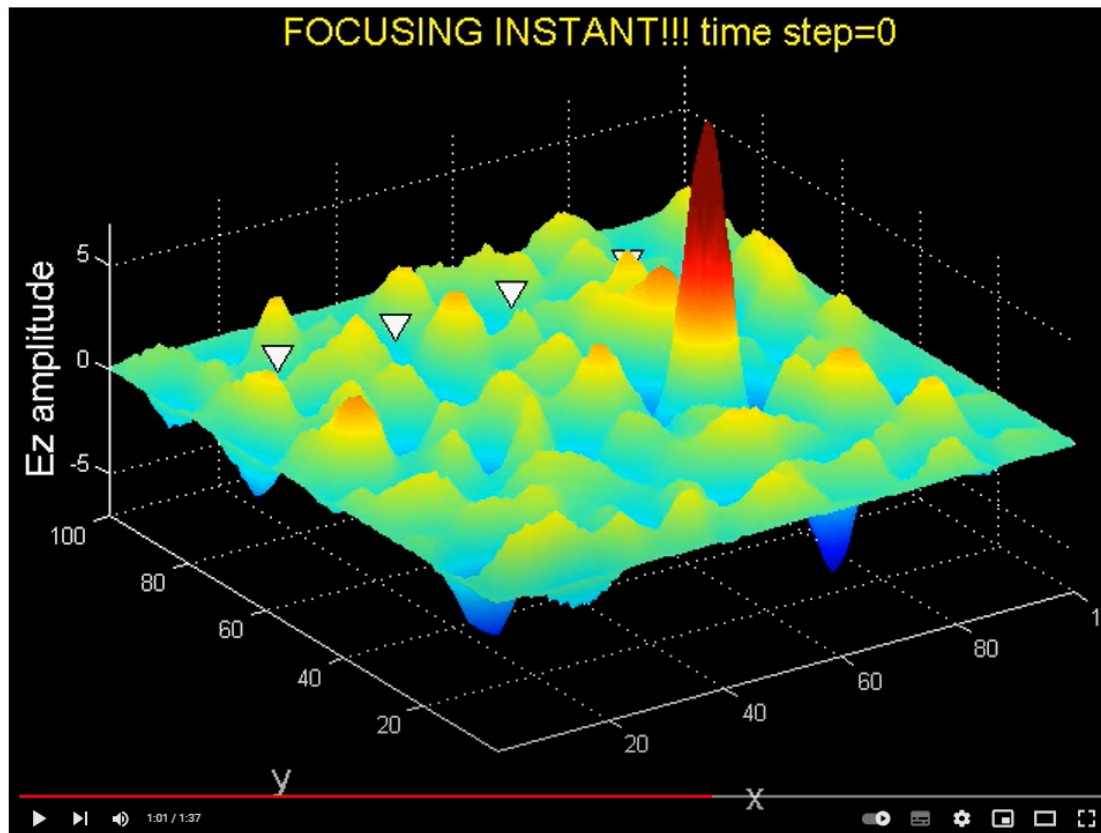


Stage #2: Back-propagation phase



Time Reversal Method

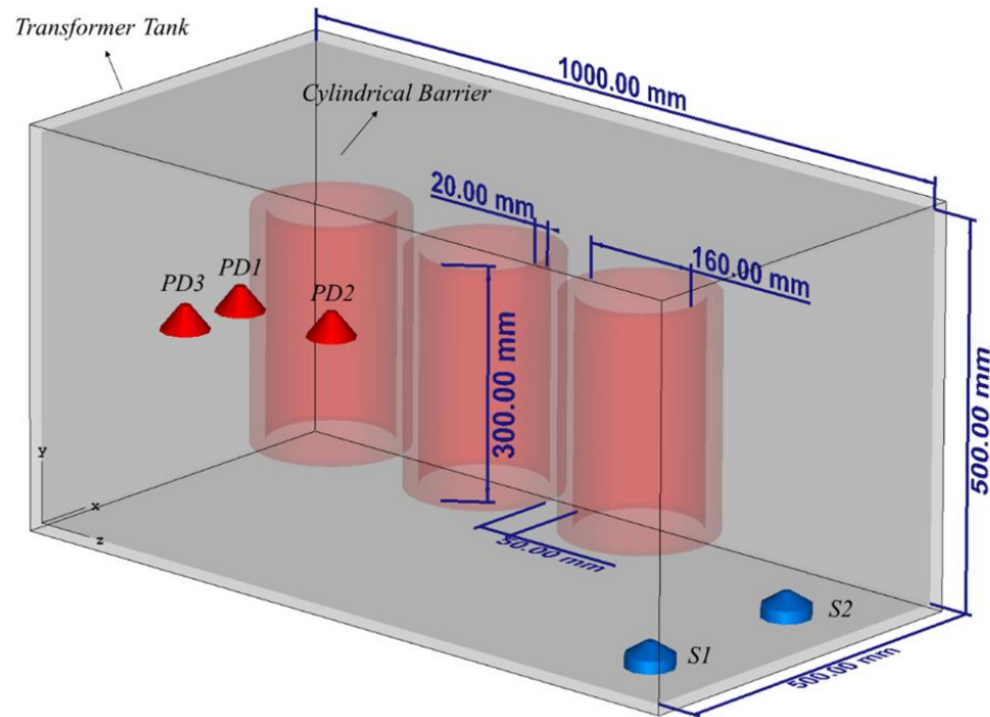
Animacja przedstawiająca działanie metody **Time Reversal**



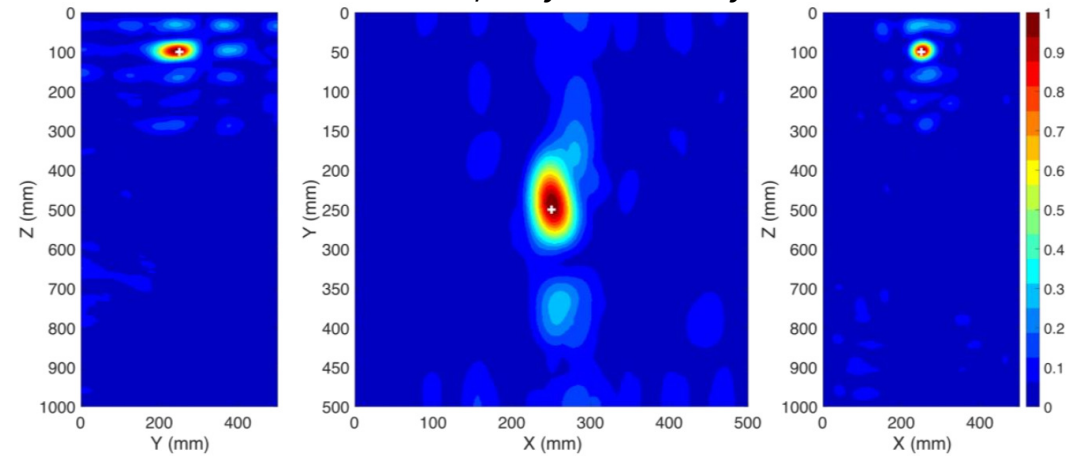
Animation author: Ph. D. Victor Lopez
Ohio State University

<https://www.youtube.com/watch?v=Axd4xfLIAk4>

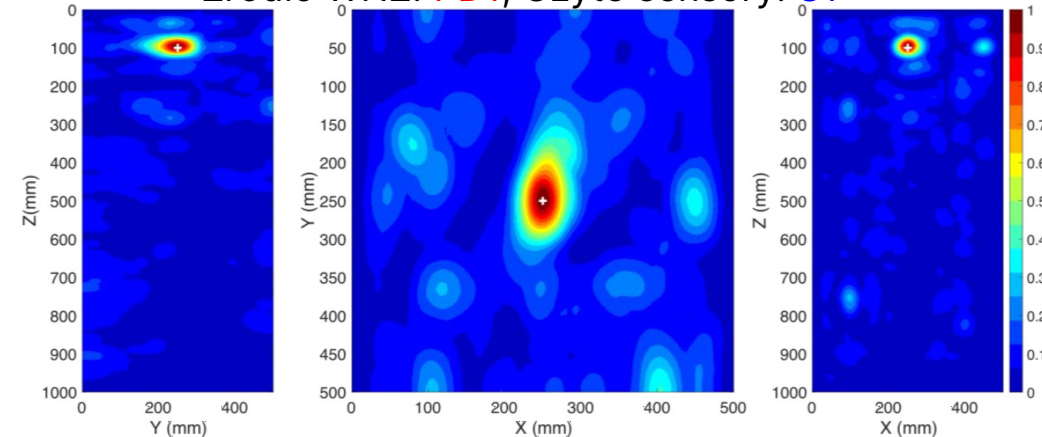
Time Reversal Method



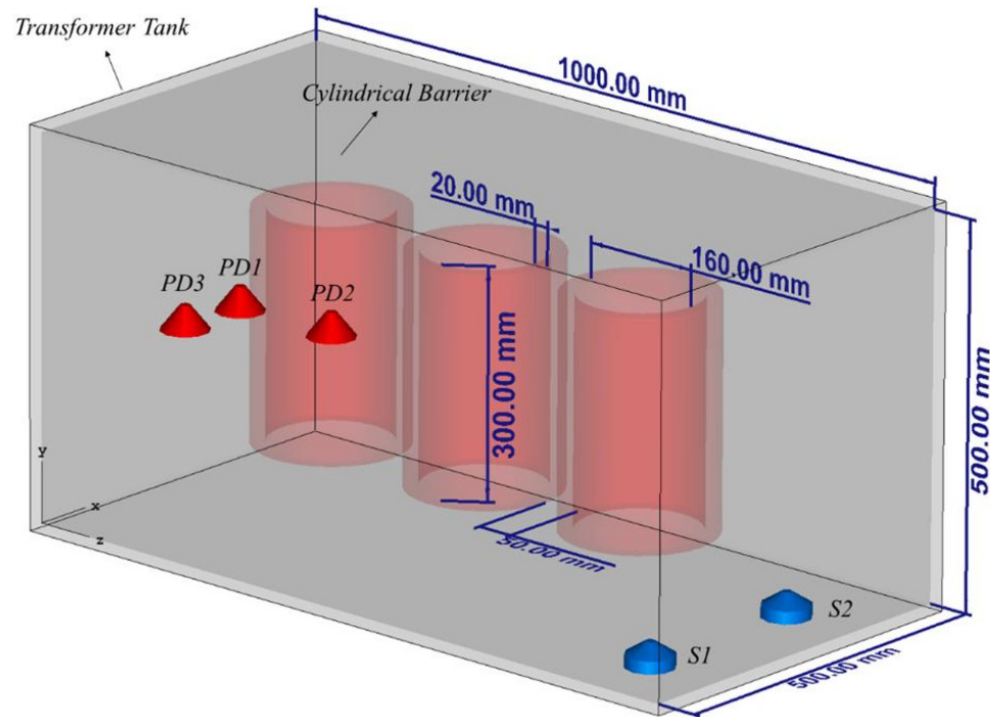
Źródło WNZ: PD1; Użyte sensory: S1 i S2



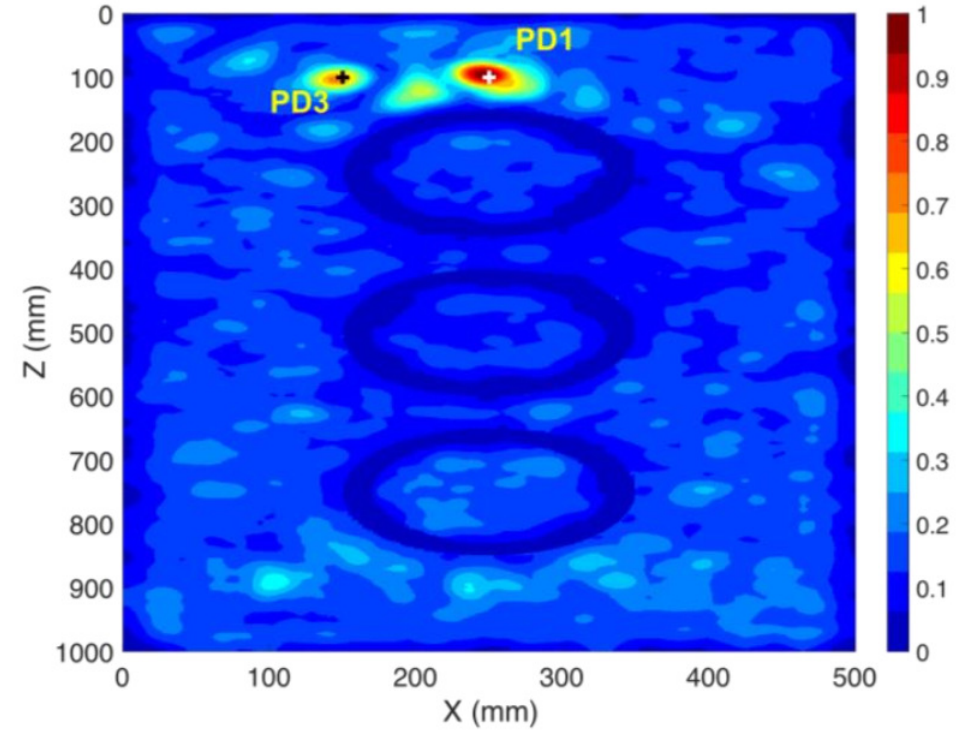
Źródło WNZ: PD1; Użyte sensory: S1



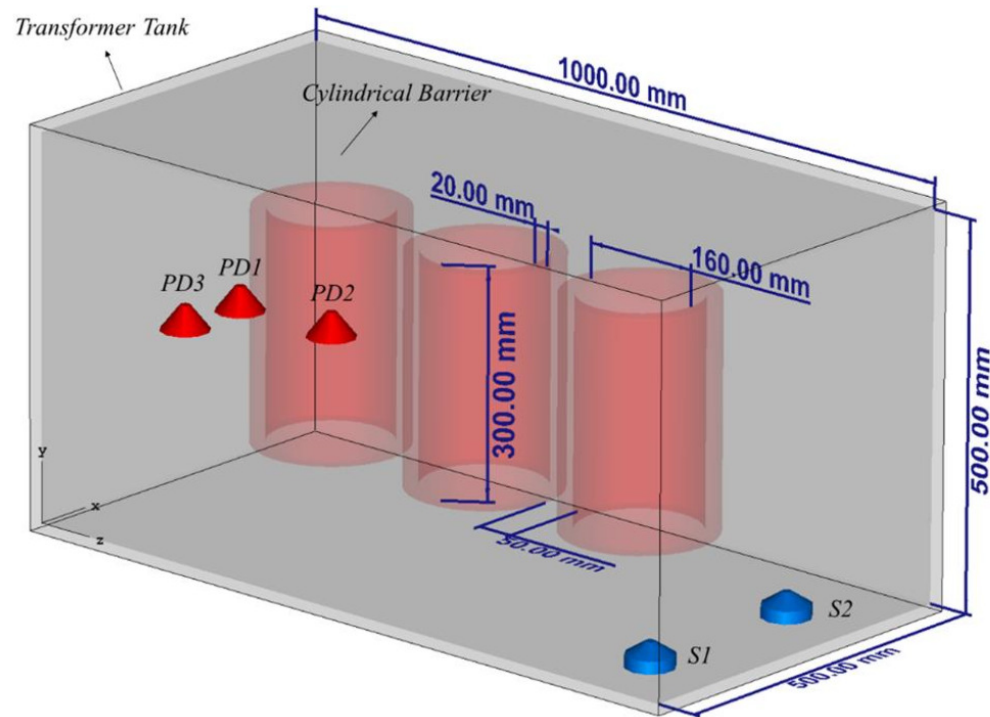
Time Reversal Method



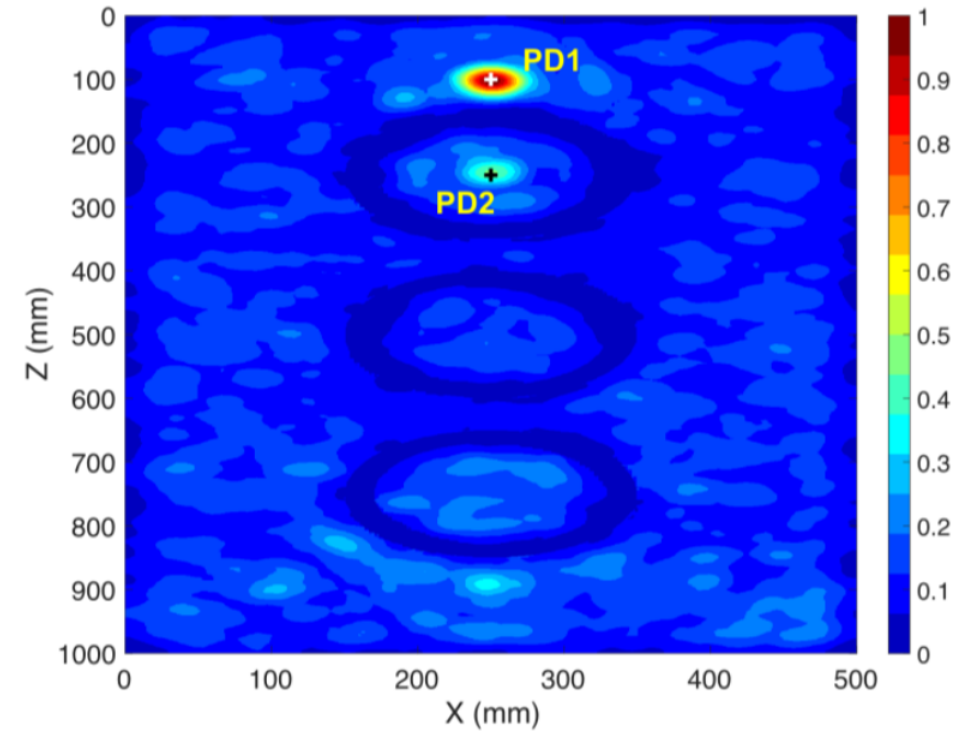
Źródło WNZ: PD1 i PD3; Użyte sensory: S1



Time Reversal Method



Źródło WNZ: PD1 i PD2; Użyte sensory: S1





Dziękuję za uwagę