



Wybrane aspekty w problematyce wyłączeń niezuppełnych w odniesieniu do diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektrycznych

Marek Florkowski

**Seminarium naukowe
IEEE DEIS (Dielectrics and Electrical Insulation)
Chapter Poland
20 X 2021**

Grupy zagadnień w diagnostyce wyładowań niezupełnych (wnz)

- Procesy degradacji w układach izolacyjnych urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia
- Warunki inicjowania wyładowań niezupełnych (wnz)
- Wydarzenie historyczne
- Impulsowy charakter wnz
- Analiza fazowo-rozdzielcza wyładowań niezupełnych
- Warunki eksploatacyjne i zakłócenia
- Diagnostyka wnz

Obiekty w elektroenergetyce

Transformatory



Kable AC/DC



Generatory



Kondensatory



Aparatura stacyjna



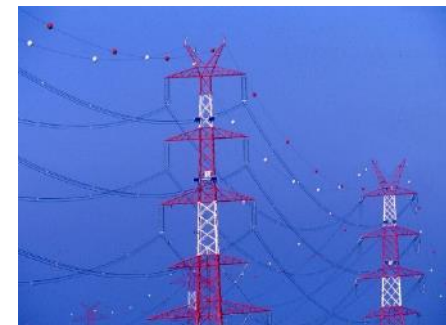
Stacje HVDC



GIS / GIL

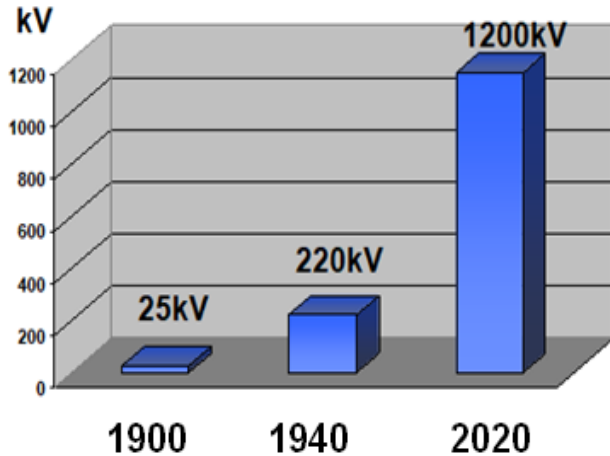


Izolatory liniowe



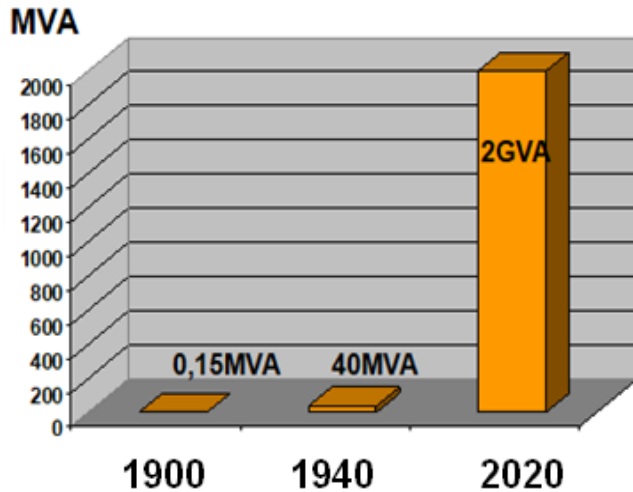
Rozwój elektroenergetyki

Wzrost poziomu napięć przesyłowych



narażenia elektryczne $E \uparrow$

Moc transformatorów

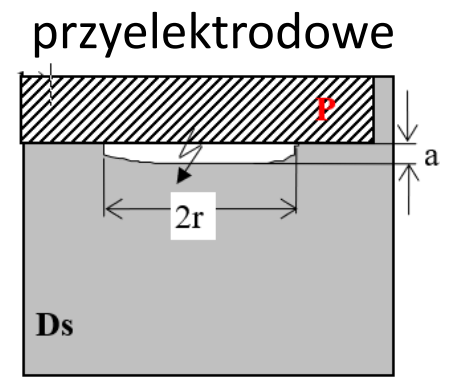
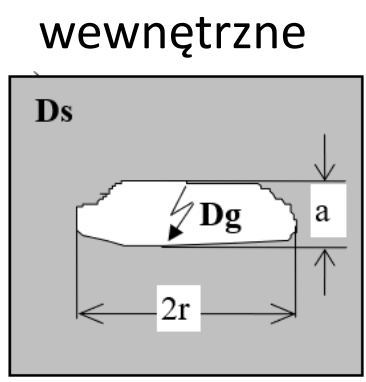


narażenia termiczne $T \uparrow$

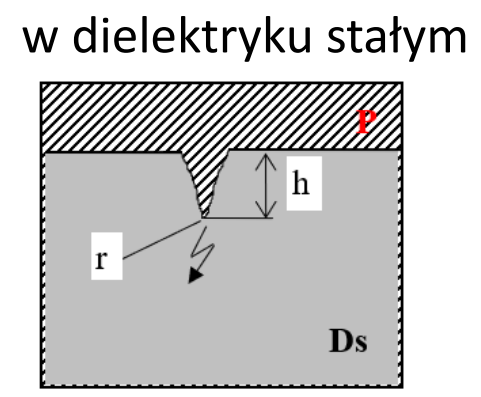
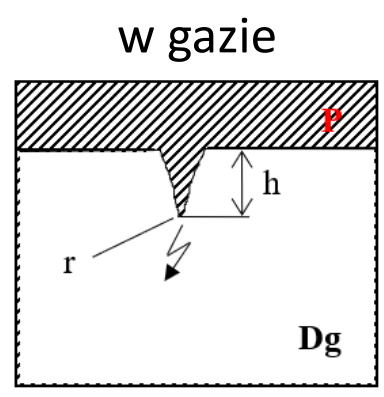
Źródło: Wysokie Napięcie w Elektroenergetyce, Wydawnictwa AGH, 2020

Defekty w strukturach układów izolacyjnych

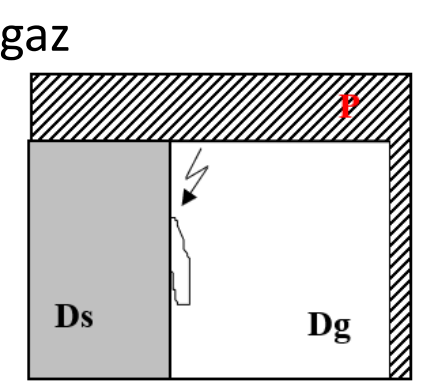
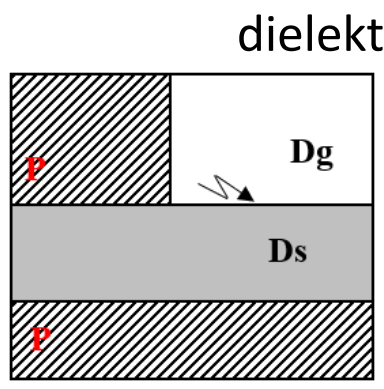
Inkluzje gazowe



Mikroostrza przewodzące



Powierzchnie graniczne



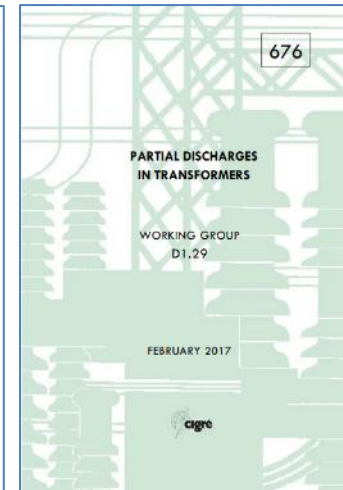
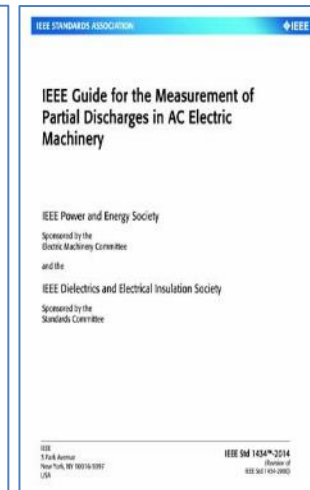
P – przewodnik
Dg – dielektryk gazowy
Ds – dielektryk stały

Wyładowania niezupełne (wnz) – Partial discharges (PD)

Wyładowanie niezupełne: jest to lokalne wyładowanie w polu elektrycznym ograniczone do części objętości lub powierzchni układu izolacyjnego, przyległe do jednej z elektrod lub nie, które w sposób bezpośredni nie powoduje powstania zwarcia międzyelektrodowego.

Formy wyładowań niezupełnych: wewnętrzne, powierzchniowe i ulotowe.

Norma: IEC 60270 (detekcja "elektryczna" do 1MHz) + wiele standardów tzw. wertykalnych



VI Międzynarodowa Konferencja Wielkich Sieci Elektrycznych CIGRE

Paryż, 1931 rok



Foto: <https://electra.cigre.org/312-october-2020/centennial-celebration/the-inter-war-years.html>

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

pod naczelnyim kierunkiem prof. M. POŻARYSKIEGO.

Rok XIII.

1 Października 1931 r.

Zeszyt 19.

Redaktor inż. WACŁAW PAWŁOWSKI

Warszawa, Czackiego 5, tel. 690-23.

ZAGADNIENIE BADANIA KABLI WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Sprawozdanie z VI Międzynarodowej Konferencji Wielkich Sieci Elektrycznych w Paryżu (18—27 czerwca r. b.).

Inż. Stanisław Bładowski.

Sprawą ujednostajnienia międzynarodowych przepisów odbioru jakoteż zagadnieniem badania kabli wysokiego napięcia zajmuje się Konferencja W. S. już oddawna. Już w roku 1927 na wniosek Holendra p. Bellaara Spruyta utworzono przy Konferencji W. S. osobną komisję kablową, która miała na celu zbadanie naukowe najróżnorodniejszych przepisów i metod badań kabli wysokiego napięcia, zawartych w rozmaitych normach krajowych, poczem — podanie wniosków w sprawie ewentualnego ujednostajnienia i uzgodnienia zapatrywań na plenum Konferencji W. S. W roku bieżącym ścisły Komitet Przygotowawczy Komisji Kablowej W. S. pod przewodnictwem Holendra p. I. R. G. J. Th. Bakker'a opracował projekt przepisów badania kabli wysokiego napięcia i rozdał go uczestnikom VI Konferencji W. S. do dyskusji.

Dla wyjaśnienia muszę zaznaczyć, że program prac Konferencji W. S. nie przewiduje wydawania jakichkolwiek przepisów międzynarodowych. Sprawa badania kabli wysokiego napięcia ze względu na swą aktualność była rozpatrywana jedynie dla celów naukowych i technicznych. Forma przepisów została przyjęta przez komitet redakcyjny komisji kablowej W. S. celem zwiększonego traktowania pewnych wniosków i propozycji, a także celem łatwiejszego sformułowania w przyszłości odnosnych przepisów przez komitety normalizacyjne krajowe i międzynarodowy.

Przedstawiony przez p. Bakker'a raport w sprawie proponowanych badań kabli wysokiego napięcia wywołał wiele ożywioną dyskusję, w której zabierali głos p.p.: Konstantinowski, Kessler, Bładowski, Dutoit, Soleri, Noirclerc, van Cauwenbergh, Proos, Rayner, Regard, Duval, Grosselin, Kopelowitch, Bakker i Bryliński. Większość mówców stanowili specjaliści, pracujący w fabrykach kablowych.

Omawiając szczegóły złożonego referatu, zamieszczać będę równocześnie głosy krytyki, jakie odzywały się w dyskusji.

Ogólnie przyjęto za zasadę przy układaniu warunków odbioru kabli, że wykonywane próby i pomiary kabli elektrycz-

nych mają na celu nie tylko wykrycie ewentualnych błędów w fabrykacji, ale winny również jaknajdokładniej informować nabywcę o właściwościach i zachowaniu się badanych kabli w czasie późniejszej pracy. Równocześnie stosowane próby odbioru nie powinny sprawiać zbyt wiele kłopotu fabrykantowi. Długotrwałe pomiary mogłyby hamować niekiedy bieżące prace laboratoriów fabrycznych, zbyt surowe próby mogłyby znów wpływać ujemnie na jakość badanego kabla. Komisja ustaliła wreszcie, że dyskutowane metody badań kabli mają dotyczyć kabli trójfazowych o napięciu roboczym od 10 do 66 kV oraz jednofazowych o napięciu od 6 do 50 kV.

I. Próby napięciowe.

Komisja Kablowa proponuje wykonywanie prób napięciowych napięciem sinusoidalnym o 50 okresach na sek. na wszystkich odcinkach kabli. Wielkość napięcia probierczego wynosi dla prób, wykonywanych w fabryce, 2,5-krotne napięcie robocze, zaś po ułożeniu — dwukrotne napięcie robocze. W razie stosowania do tych prób prądu stałego względnie wyprostowanego powyższe wartości napięć probierczych wzrastają jeszcze 2,5-krotnie. Czas trwania próby wynosić ma dla każdego układu probierczego żył po 15 minut.

Komisja Kablowa doszła zasadniczo do przekonania, że kable prądu trójfazowego winno się właściwie badać napięciem trójfazowym, jednak licząc się z faktem, że niewiele laboratoriów fabrycznych posiada już transformatory probiercze wysokiego napięcia w układzie trójfazowym, zatrzymano w propozycji nadal metodę badania jednofazowego. W razie zastosowania do prób napięcia trójfazowego badanie kabli trójfazowych skróciłoby się do 10 minut.

Komisja Kablowa zwróciła uwagę na konieczność dokładnego zdefiniowania pojęcia „napięcia roboczego” w kablach trójfazowych normalnych i trójfazowych o radialnym polu elektrycznym (kable jednożyłowe trójfazowe, trójplaszczowe



Prof. Stanisław Bładowski
1902-1971

Założyciel w AGH na wydziale Elektrycznym
Katedry Urządzeń Sieci Elektrycznych
w następnych latach
Katedry Elektroenergetyki.
Zaprojektował i zbudował
Laboratorium Wysokich Napięć
na Wydziale Elektrycznym AGH.

Konferencja Wielkich Sieci Elektrycznych → **Komisja Kablowa** (1927, Bellaard Sprayt)
Pierwsze ujednoczenie przepisów i metod badań kabli wysokiego napięcia (do 66 kV) - 1931

Zjawisko stwierdzone w kablach energetycznych określono mianem **jonizacji**.

Metody badań kabli* ustalone przez Komisję Kablową WSE w roku 1931

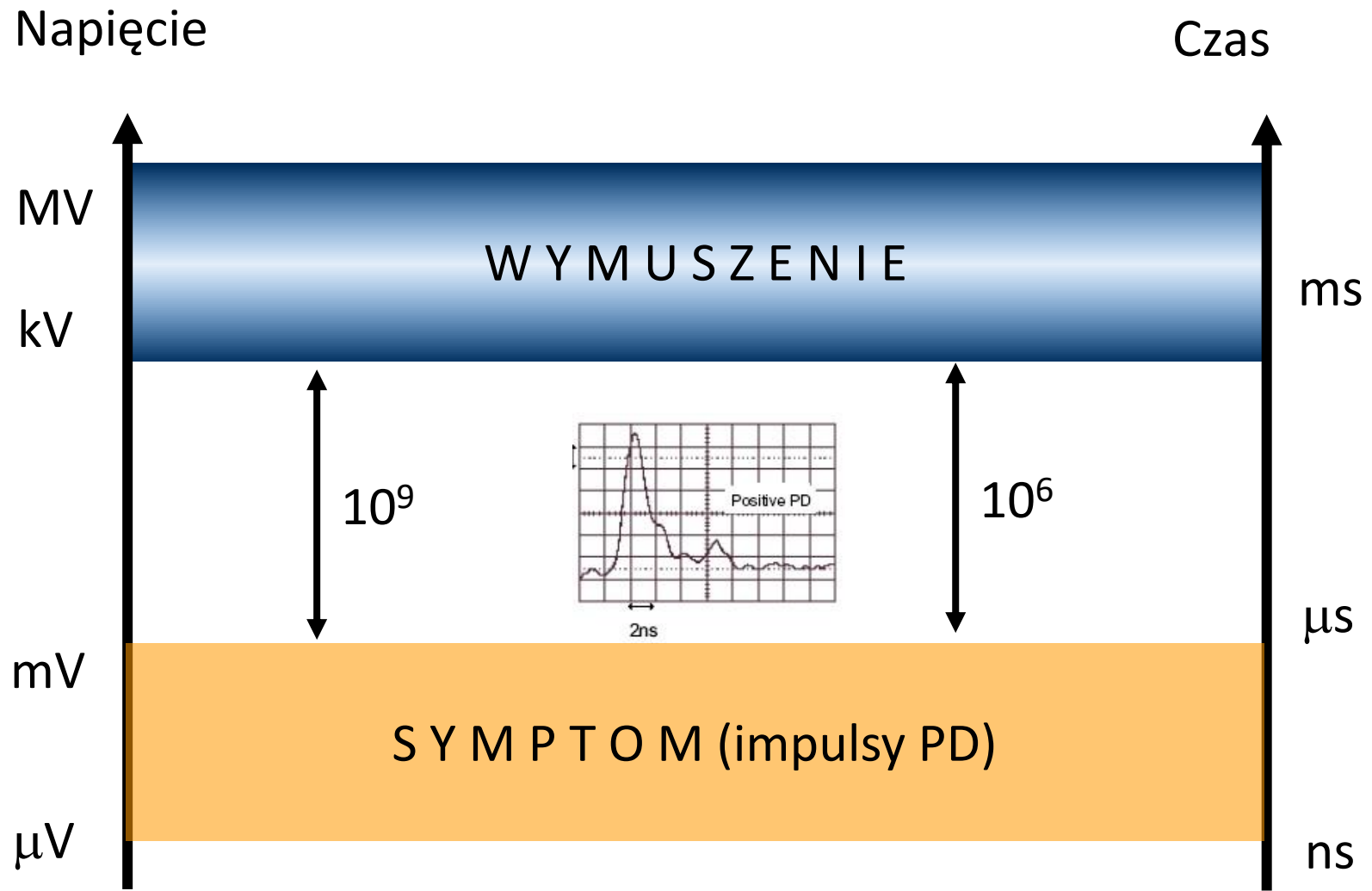
1. próba napięciowa
2. próba na przebicie
3. pomiar **spółczynnika** stratności dielektrycznej
4. pomiary grubości izolacji
5. pomiar pojemności i oporności izolacji
6. próby na zginanie

*kable 3-fazowe, $U_n \leq 66$ kV,
kable 1-fazowe, $U_n \leq 50$ kV,
izolacja nasycona papierowo-olejowa

Polski Komitet Wielkich Sieci Elektrycznych (PKWSE) →



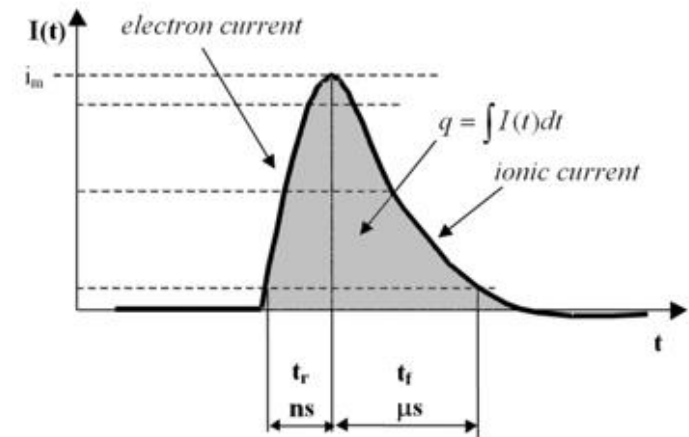
Specyfika diagnostyki WNZ



Impulsowy charakter wyładowań niezupełnych

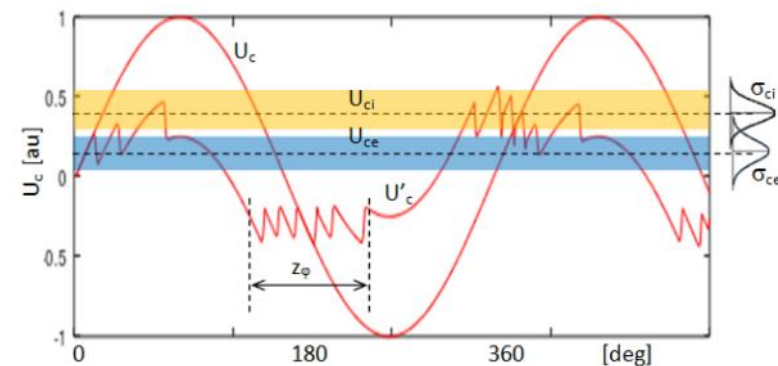
Charakterystyka:

- zjawisko w silnym polu elektrycznym
- przejawem impulsy prądowe
- stochastyczny charakter



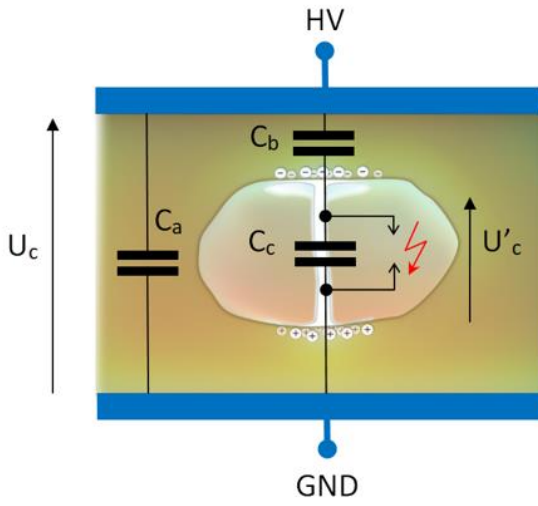
Parametry wyładowań niezupełnych:

- ładunek / amplituda
- napięcie zapłonu i gaśnięcia U_{ci}/U_{cg}
- położenie fazowe (czasowe) φ
- zakres fazowy z_φ
- ...

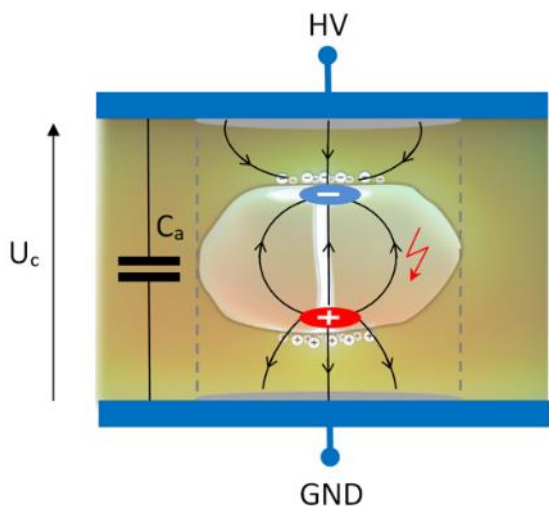


Modele wyładowań niezupełnych

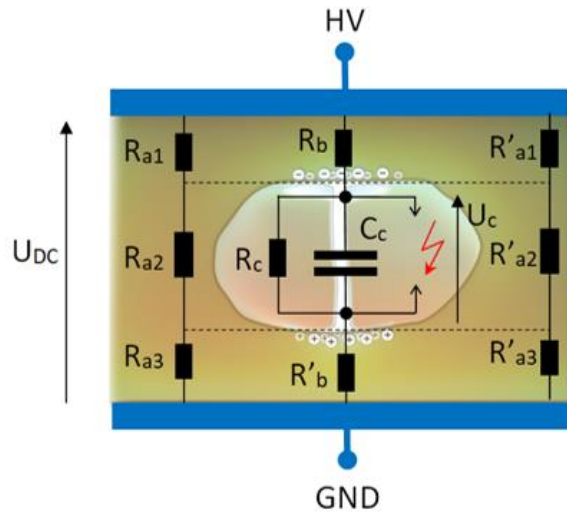
Model pojemnościowy "a-b-c"



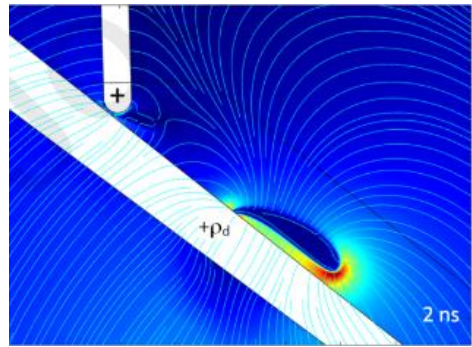
Model dipolowy



Model DC

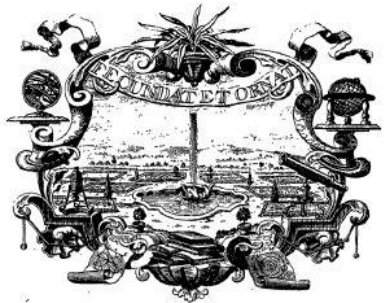


Streamer - model przepływu / dyfuzji



Pierwsze rejestracje wyładowań – Figury Lichtenberga

NOVI
COMMENTARII
 SOCIETATIS REGIAE
 SCIENTIARVM GOTTINGENSIS.
 TOMVS VIII.
 AD A. MDCCCLXXVII. (1777)

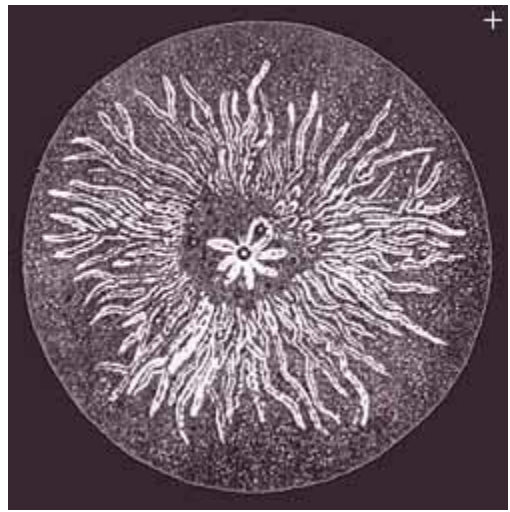
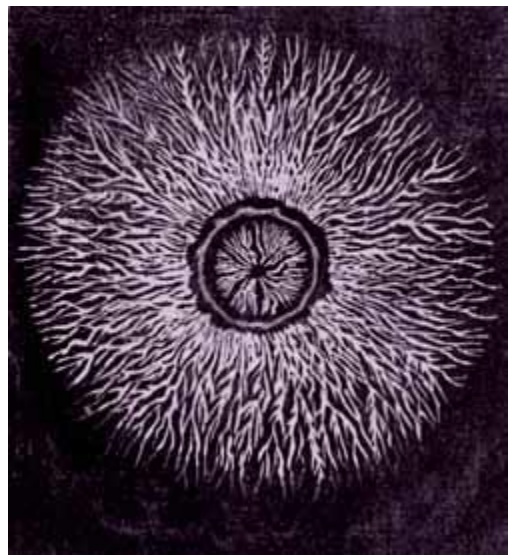
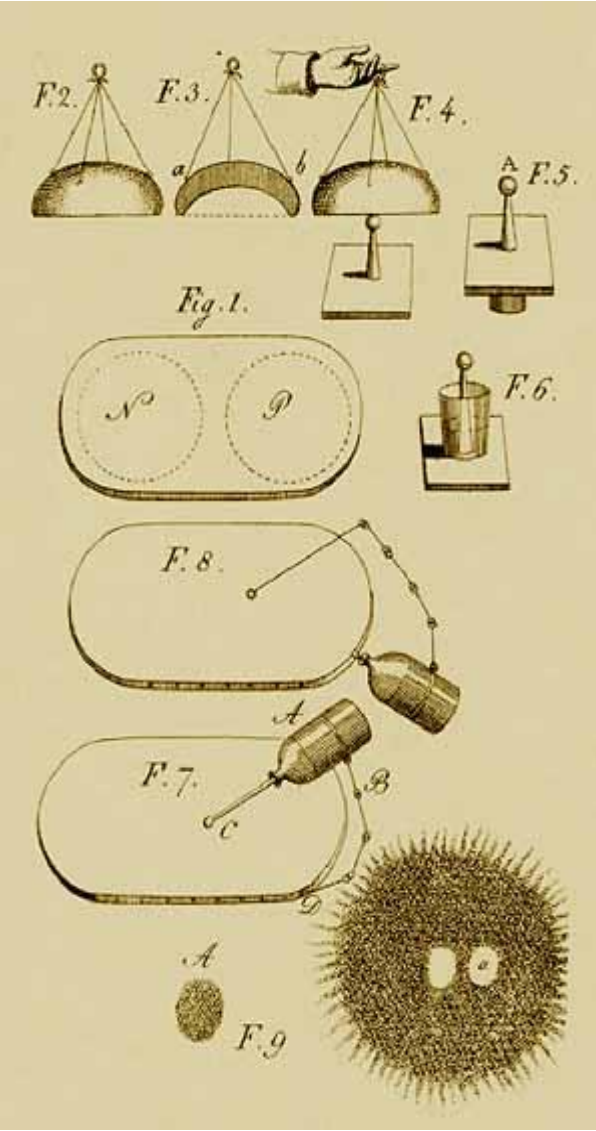


GOTTINGAE, 1777
 Apud JOANN. CHRISTIAN. DIETERICH, MDCCCLXXVIII.

DE
**NOVA METHODO NATVRAM
 AC MOTVM FLVIDI ELECTRICI
 INVESTIGANDI**
 COMMENTATIO PRIOR,
 EXPERIMENTA GENERALIORA CONTINENS.
 LECTA
 IN CONSENSV PUBLICO SOCIETATIS REGIAE
 SCIENTIARVM.
 D. MDL. FRVB. MDCCCLXXVIII.

Inter notabiliora, quibus recens ditata est doctrina de Electricitate, inventa, haud immerito censendus est Electroforus, cujus inventorem Cel. Wilhelmo Vismariensem, Phylicos nunc Holmiae Professore, concivem olim nostram, appellare non dubito a). Cel. Volta enim, hanc machinam non tum invenit, quam apparatus instrumentorum, quem, ad demonstranda quaedam circa experimenta Logisarensia phaenomena, ex vitro Jan. An. 1762 sibi contraxerat Wilhelms, ex refina, materia quippe magis apta, confectum, machinae electricae dignitate et Electrofori perpetui nomine donavit. Notandum tamen est, tum valde probabile esse,

a) Vid. Scripta Academiae Saec. Scientiarum ad ann. 1762.

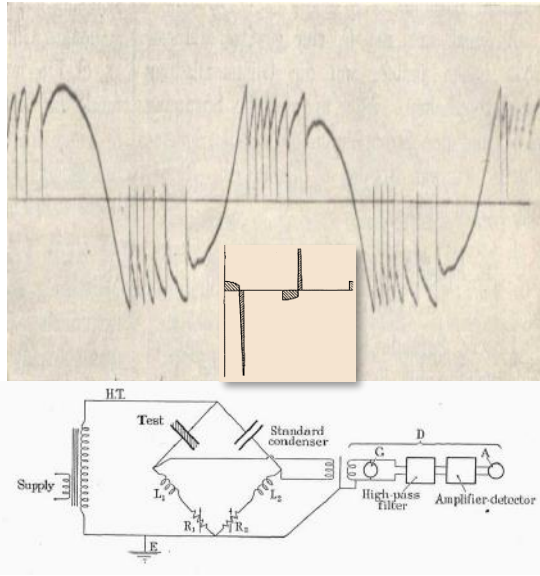


Milestones in Partial Discharge recording

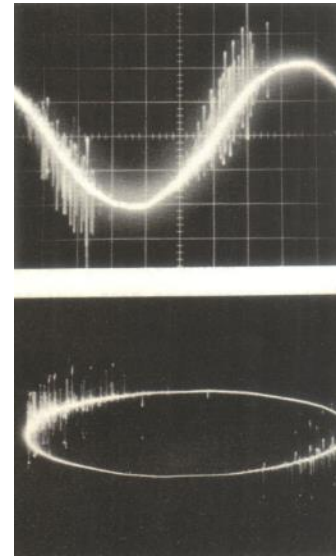
Lichtenberg's figures*



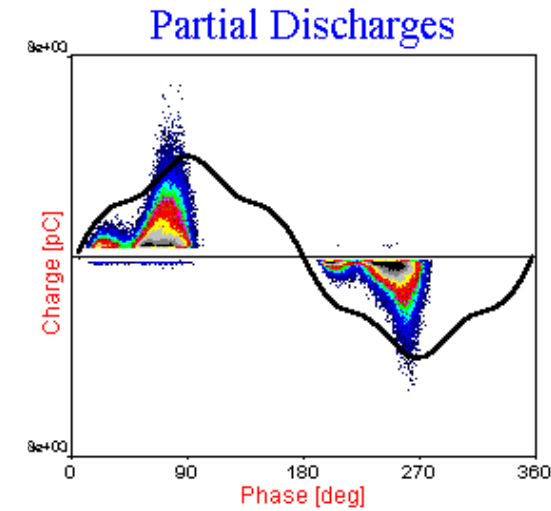
Gemant –Philippoff♣
Arman-Starr♦



Phase Resolved PD
in elliptical form ♠



PRPDA ♥
Phase Resolved PD Analysis



1777

1932 /1936

1960

1988

*Ch. Lichtenberg: Novi Commentarii SocietatisRegiae Gottingae T8, 1777

♣A. Gemant and W. Philippoff, "Die Funkenstrecke mit Vorkondensator", Zeitschrift fur Techni. Physik, vol. 13, no. 9, 1932

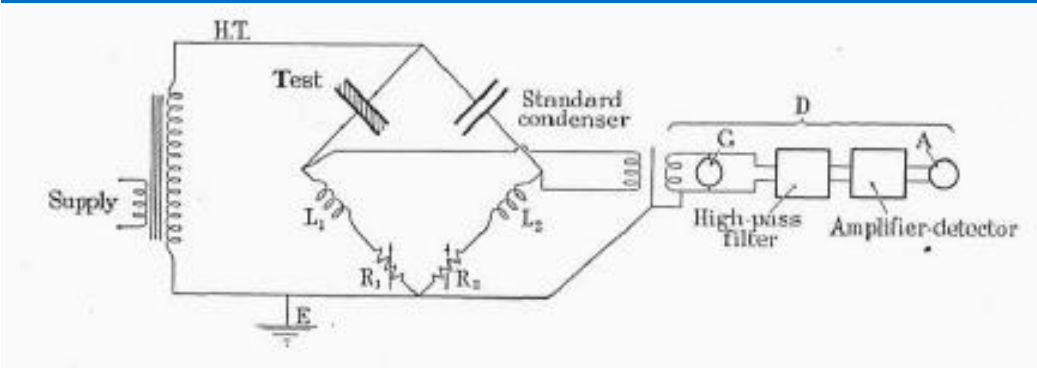
♦A.N. Arman; A.T. Starr: The measurement of discharges in dielectrics. JIEE 79, No. 88-94, 1936

♠ T.W. Dakin; P.J. Malinaric, A capacitive bridge method for measuring integrated corona charge transfer and power loss per cycle. Trans AIEE PAS 79, 1960

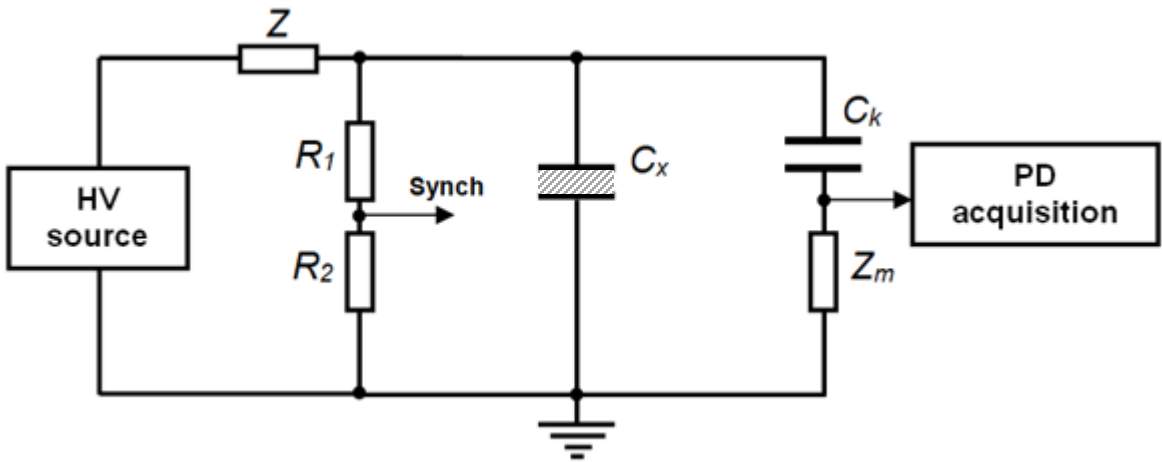
♥ B.Fruth, Switzerland, Phase Resolved Partial Discharge Measurements and Computer Aided Partial Discharge Analysis Performed on Different High Voltage Apparatus, 1988.

Detekcja wyładowań niezupełnych

Wg A.N. Arman; A.T. Starr (1936)

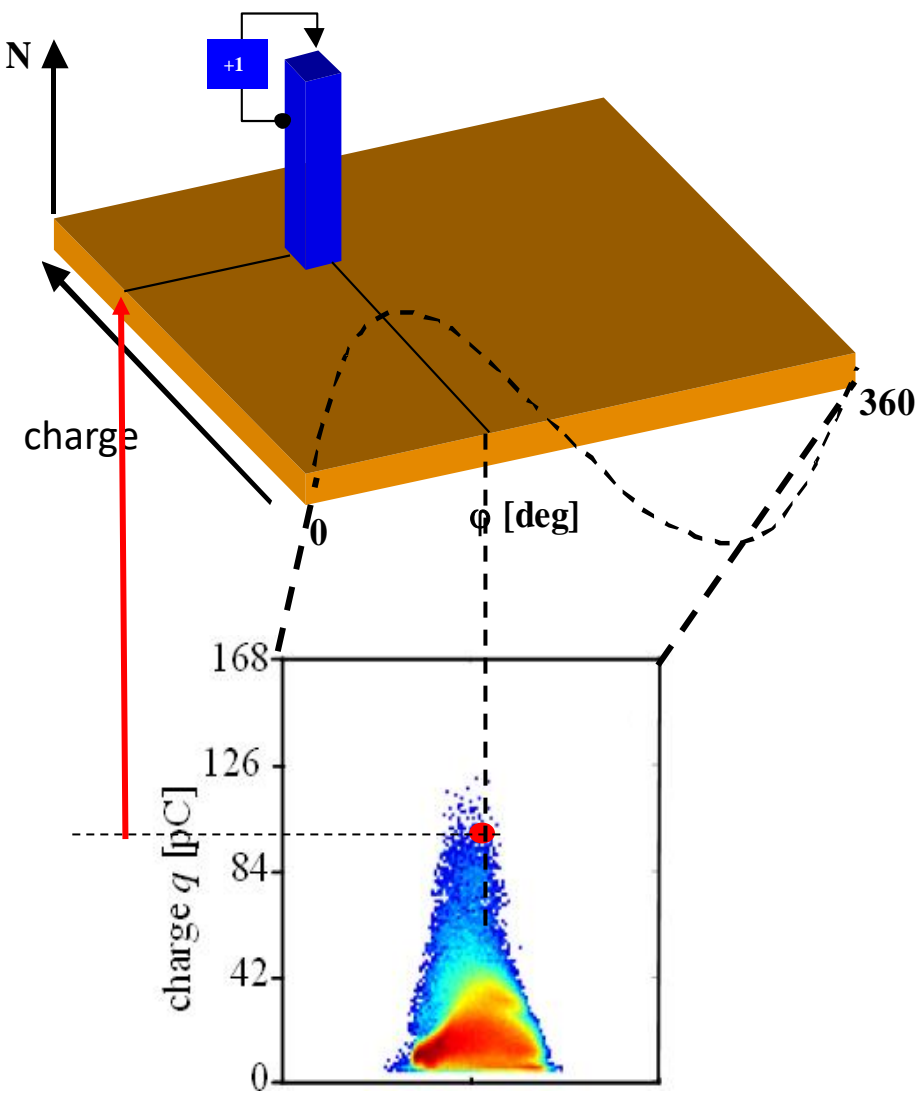


Wg IEC 60270



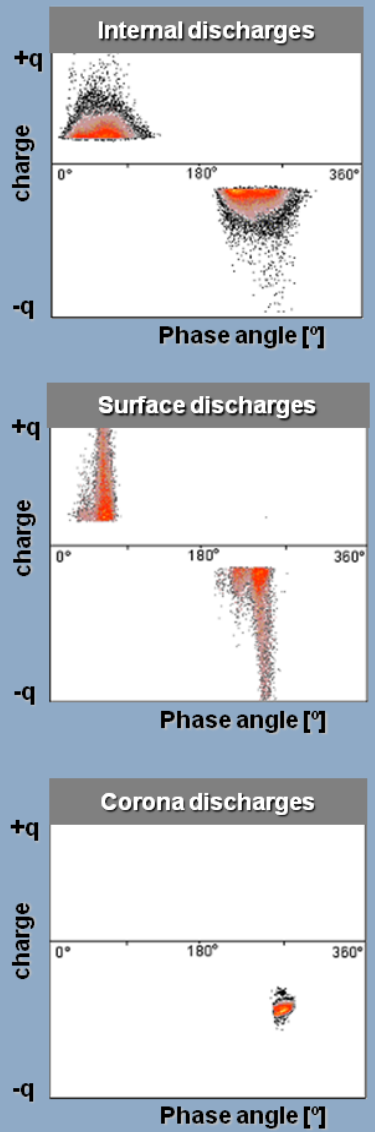
- C_x – badany obiekt
- C_k – kondensator sprzęgający
- Z_m – impedancja pomiarowa

Phase-Resolved Partial Discharge Analysis



PRPDA - Phase Resolved Partial Discharge Analysis

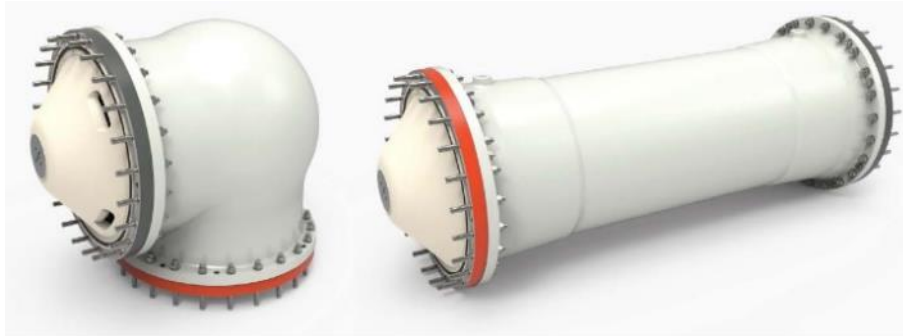
Canonical forms of discharges



Wyładowania niezupełne – układy izolacyjne

GIS / GIL

Izolacja gazowa i stała



Maszyny elektryczne

Izolacja termoutwardzalna



Kable

Izolacja polimerowa XLPE



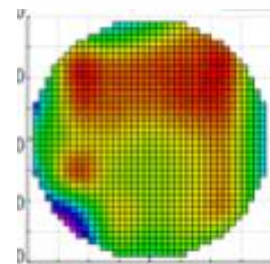
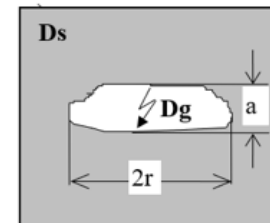
Transformatory

Izolacja warstwowa nasyczona

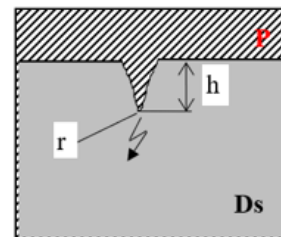


WNZ w źródłach wyładowań

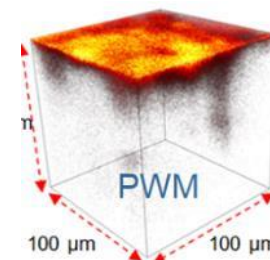
- **inkluzyje gazowe** → jonizacja przestrzenna
 - wizualizacja procesów erozyjnych w źródłach wyładowań



- **mikroostrza przewodzące** → drzewienie elektryczne



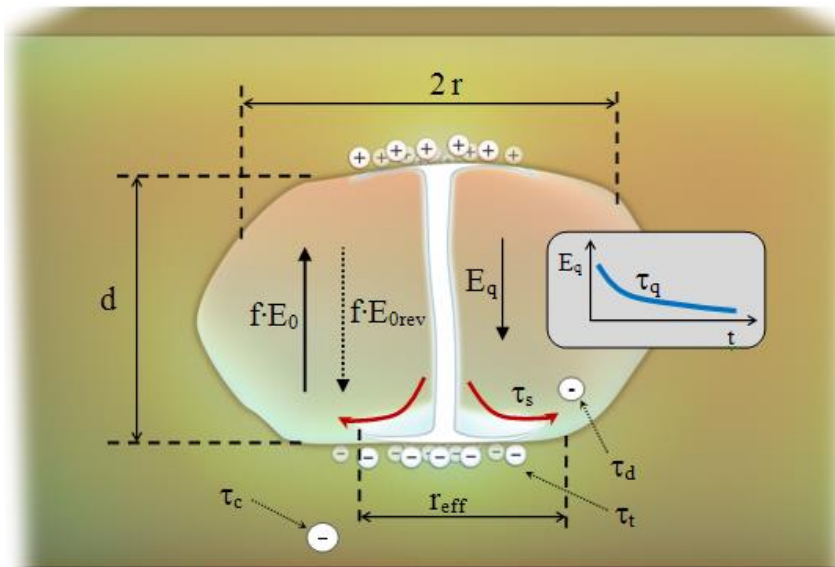
- migracje na granicy warstw przewodnik / dielektryk



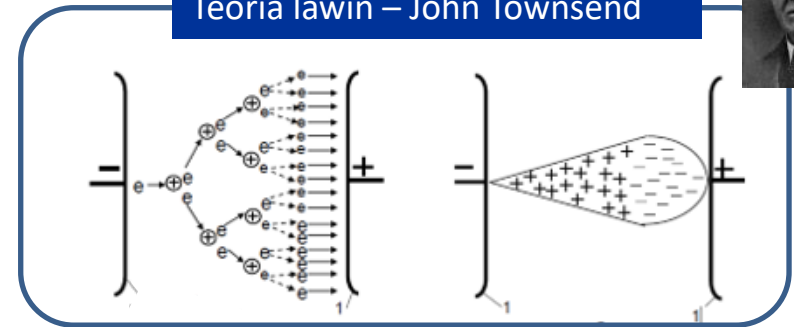
Wyładowania niezupełne – inkluzje gazowe

Inkluzja gazowa - jonizacja przestrzenna

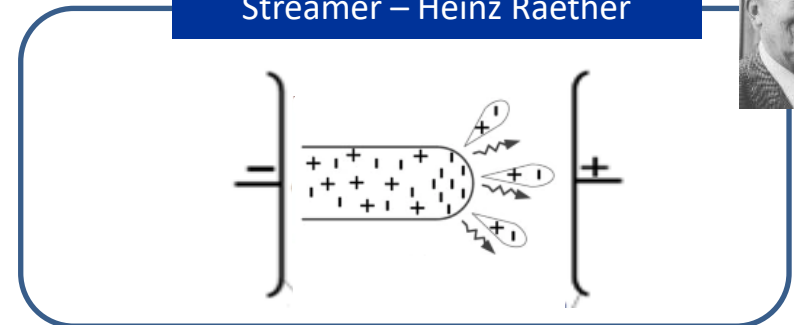
- teorie inicjowania i rozwoju wyładowań niezupełnych: lawiny, streamer Townsend, Loeb, Raether, Meek-Craggs
- efekty pamięciowe „memory effects”



Teoria lawin – John Townsend



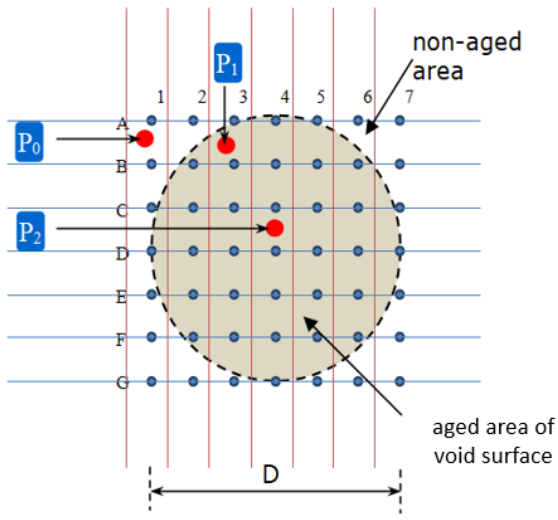
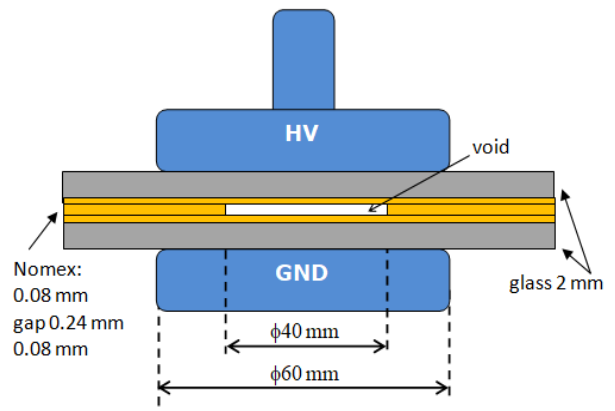
Streamer – Heinz Raether



Wizualizacja procesów erozyjnych w źródłach wyładowań
MAPPING – mapy klastrów erozyjnych

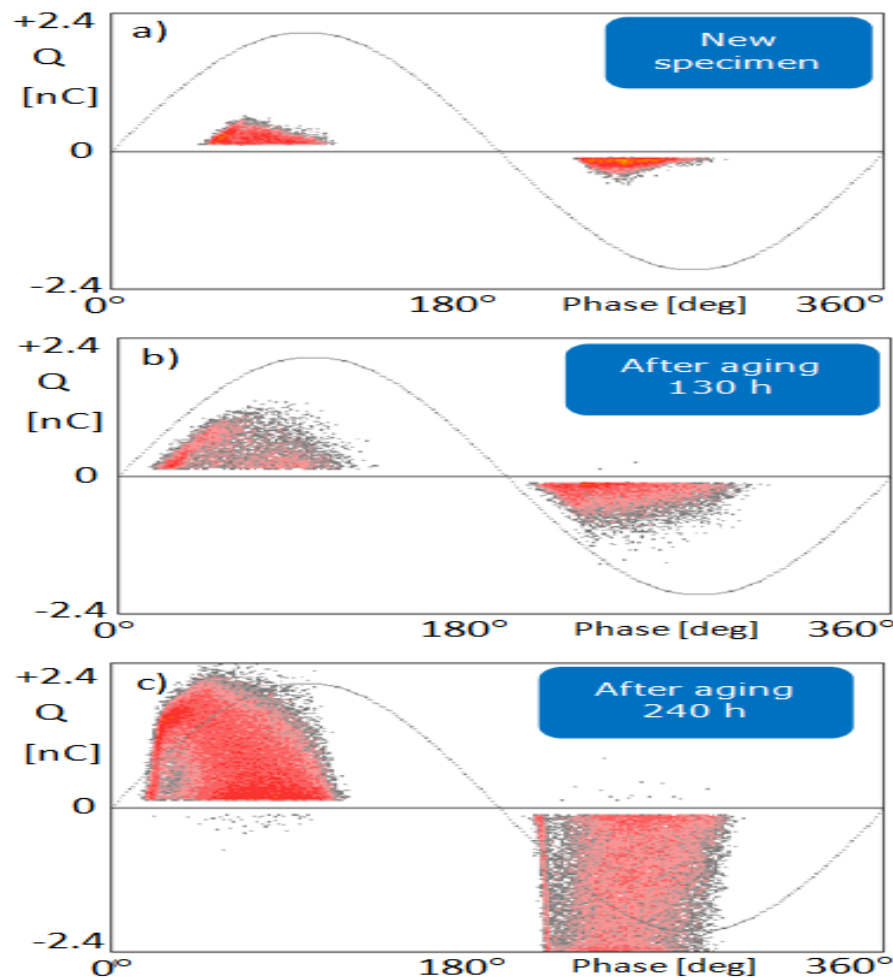
PD: Surface resistivity mapping

Specimen and setup



P_0 –untreated area, P_1 -boundary area, P_2 -discharge channel area

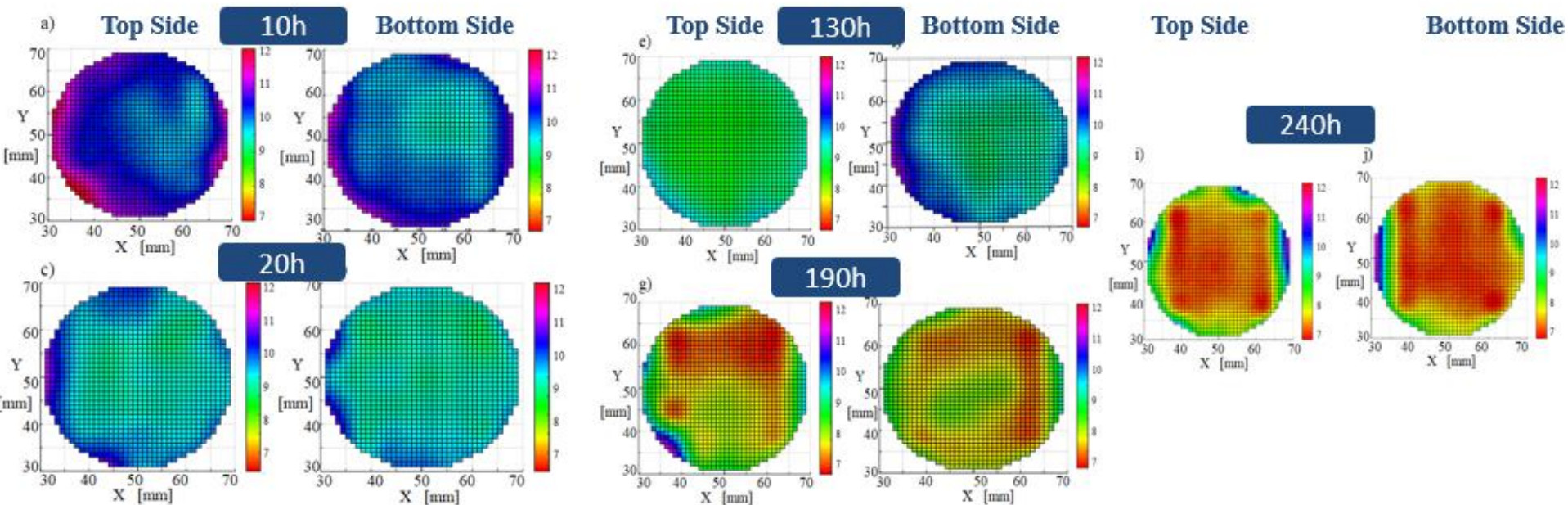
PD patterns during aging stages (9 kV, $1.5U_0$)



Source: M.Florkowski, B.Florkowska, M.Kuniewski, P.Zydroń, Mapping of discharge channels in void creating effective partial discharge area, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 25, No. 6, 2018.

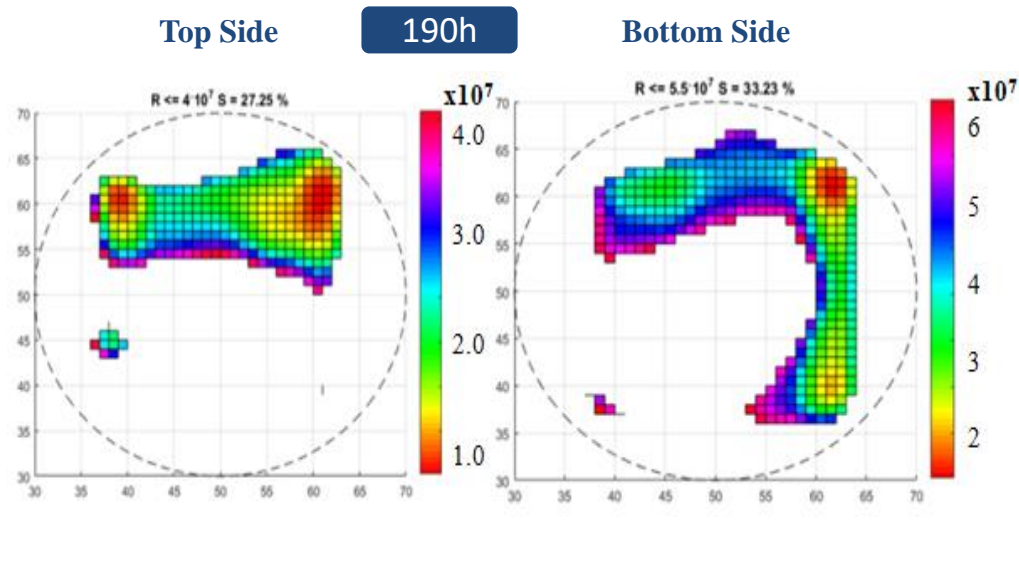
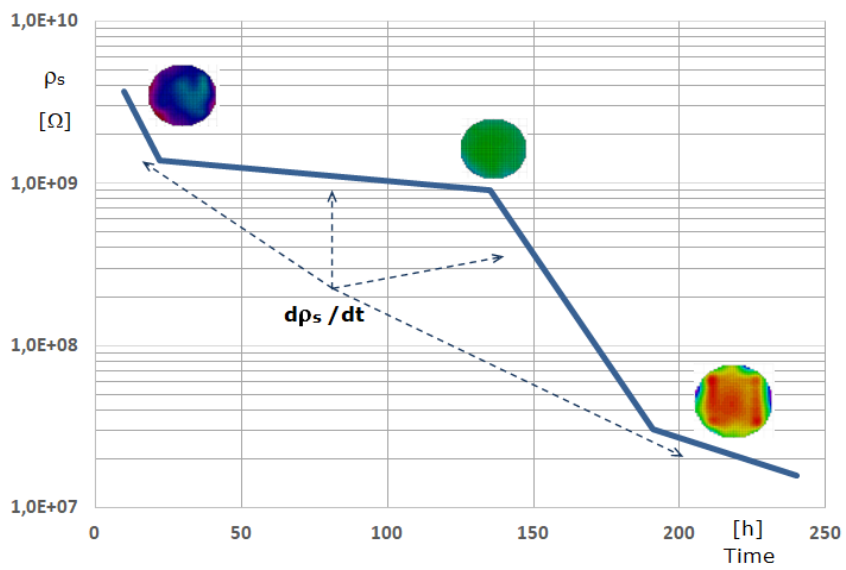
PD: Surface resistivity mapping

Evolution phases of void surface resistivity during PD exposition ρ_s [$\Omega 10^x$]



PD: Surface resistivity mapping

Evolution phases of void surface resistivity during PD exposition ρ_s [$\Omega \cdot 10^x$]



Threshold levels for aged substages and percentage share of area

Substage	THRESHOLDS	
	TH_{HIGH_I} [Ω] TOP / BOTTOM VOID WALL	P_I TOP / BOTTOM [%]
After 10 h	$10^{10} / 4 \cdot 10^9$	23 / 17
After 20 h	$0.25 \cdot 10^{10} / 2 \cdot 10^9$	27 / 22
After 130 h	$7 \cdot 10^8 / 2 \cdot 10^9$	27 / 24
After 190 h	$4 \cdot 10^7 / 6 \cdot 10^7$	27 / 33
After 240 h	$10^8 / 6 \cdot 10^7$	45 / 45

Source: M.Florkowski, B.Florkowska, M.Kuniewski, P.Zydroń, Mapping of discharge channels in void creating effective partial discharge area, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 25, No. 6, 2018.

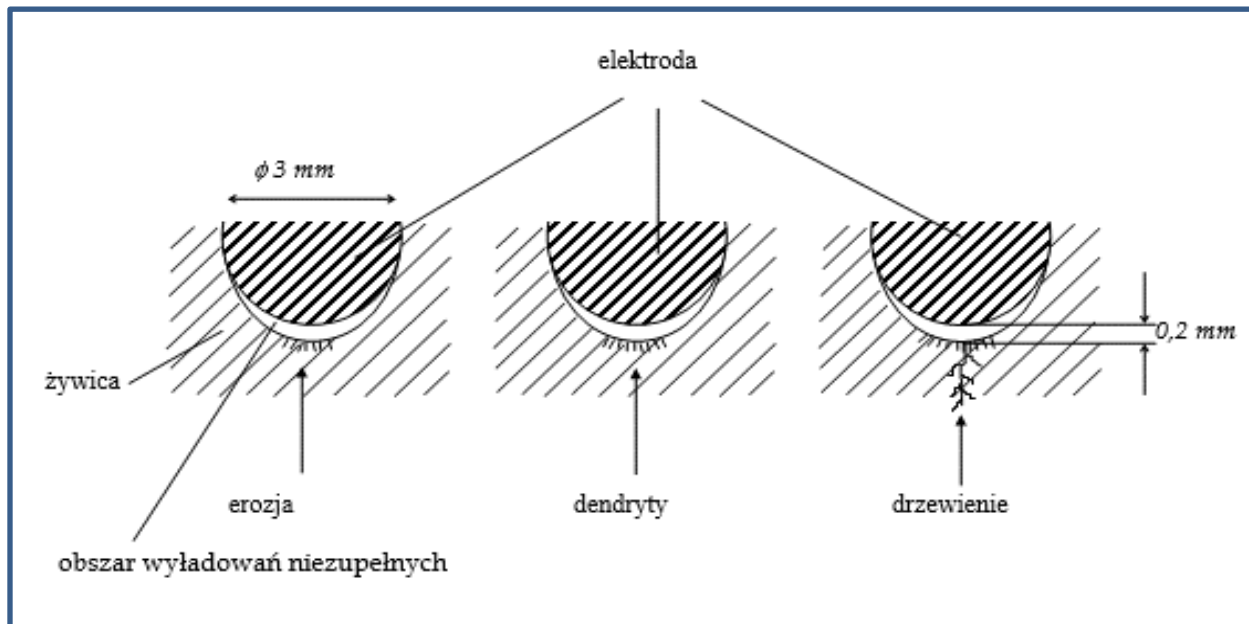
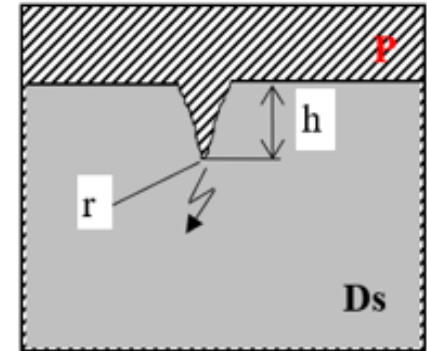
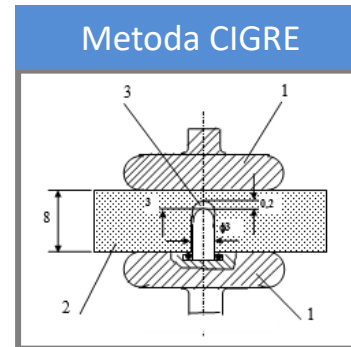
Wyładowania niezupełne – mikroostrza przewodzące

Mikroostrza przewodzące → drzewienie elektryczne (ang. electrical treeing)

iniekcja polowa (określona przez Fowlera-Nordheima)
zależy od:

- natężenia pola elektrycznego
- pracy wyjścia z katody
- współczynnika mikrogeometrii

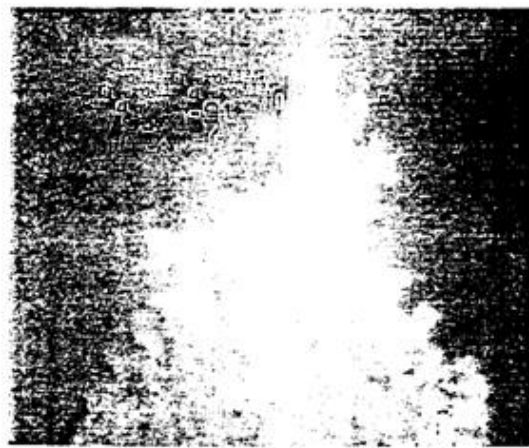
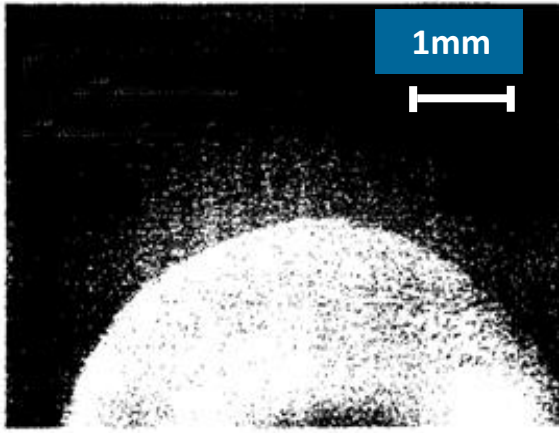
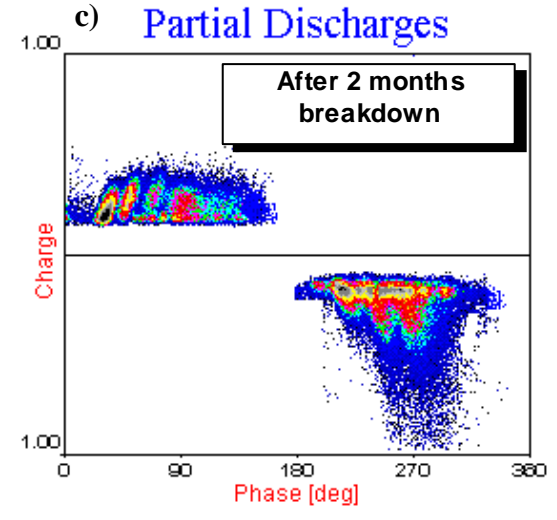
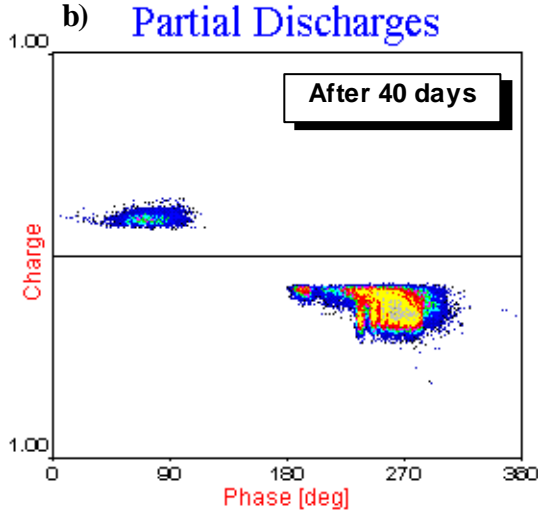
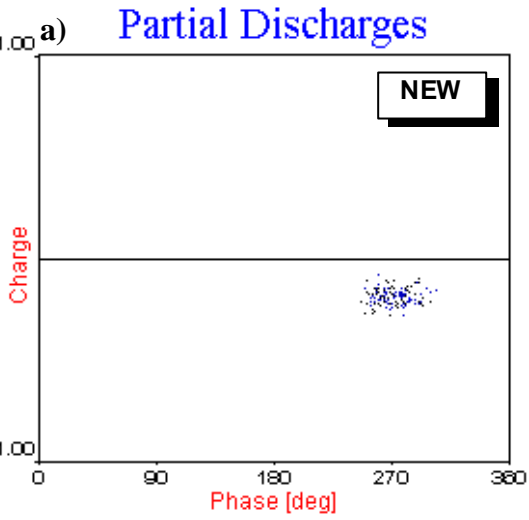
E
 Φ
 β



Próba igłowa w PE

Degradation of polymer structure – electrical treeing

CIGRE method



Stages of erosion processes in synthetic polymers

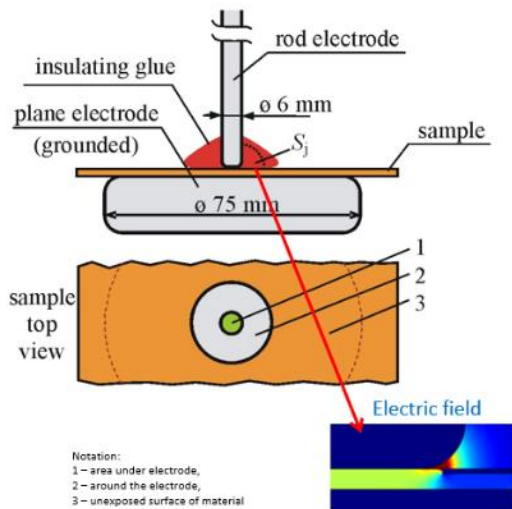
Source: M. Florkowski, "Partial Discharge Image Recognition Using Neural Network for High Voltage Insulation Systems", Wydawnictwa AGH, ISSN 0867-6631

Migracje na granicy warstw przewodnik / dielektryk

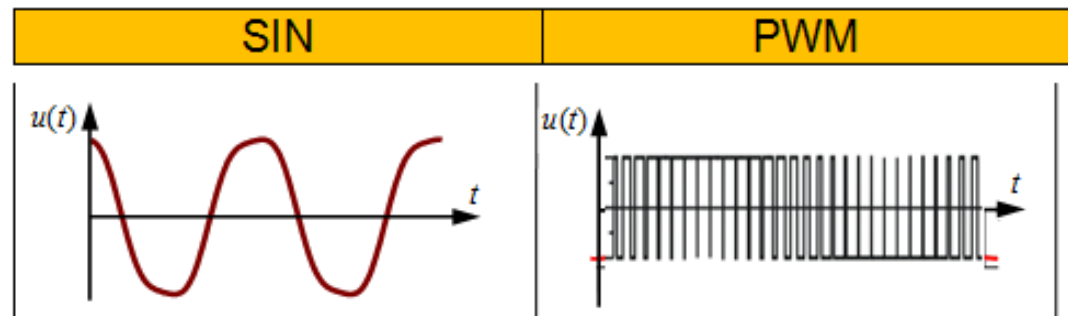
Migration at conductor/substrate interface subjected to PD

- Investigations of interfacial metal migration into dielectric materials subjected to PD stress
- Studied under various electrical stresses: DC, PWM, SIN
- Long term aging test
- Electrical and thermal migration mechanism was investigated
- Assessment: time to breakdown and both micro morphological and elemental analysis

Specimen and setup



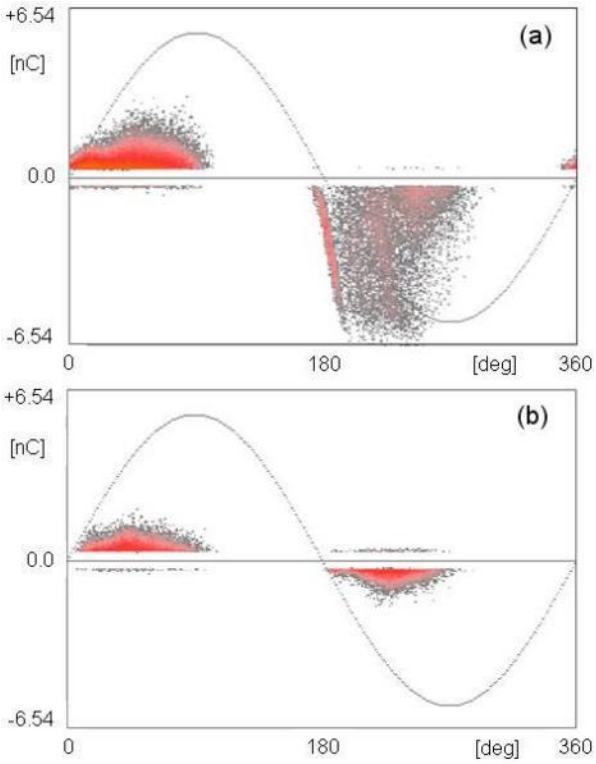
Electrical stimuli



- DC: 5 kV DC voltage
- SIN: sinusoidal voltage with amplitude 5kV
- PWM (Pulse Width Modulation): two levels, bipolar PWM, peak value ± 5 kV, 50 Hz fundamental frequency, and the rise-time 600 ns.

Migration at conductor/substrate interface subjected to PD

Partial Discharges



PD patterns obtained for SIN voltage at amplitude 5 kV at the beginning of the aging test for:
 a) setup with surface discharges (SD),
 b) setup without surface discharges (SDC)

Results: Cu content at various voltage stimuli

Average Cu content at different distances from the surface of specimen for different voltage stimulus.

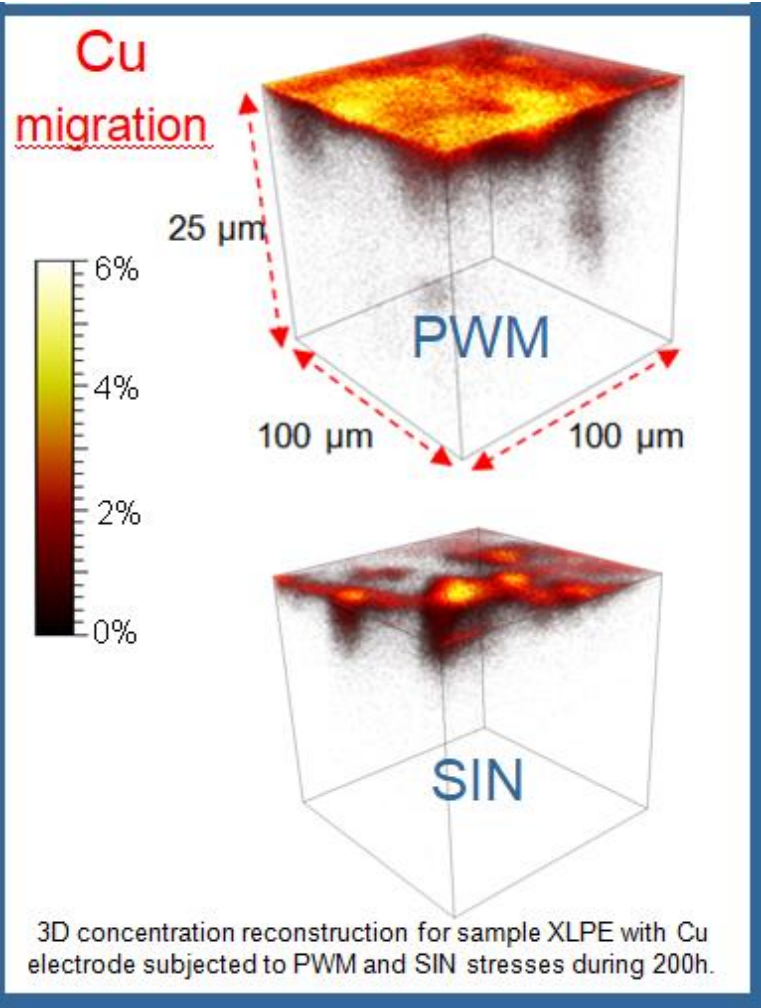
		Cu content (at.%) at distance from surface		
		0 [μm]	5 [μm]	10 [μm]
Type of stimulus	PWM*	1,93	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$
	SIN*	0,92	$8,29 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$
	DC**	$3,17 \cdot 10^{-2}$	-	-

Experiment time was (h): *200, **450. Applied voltage was 5 kV.

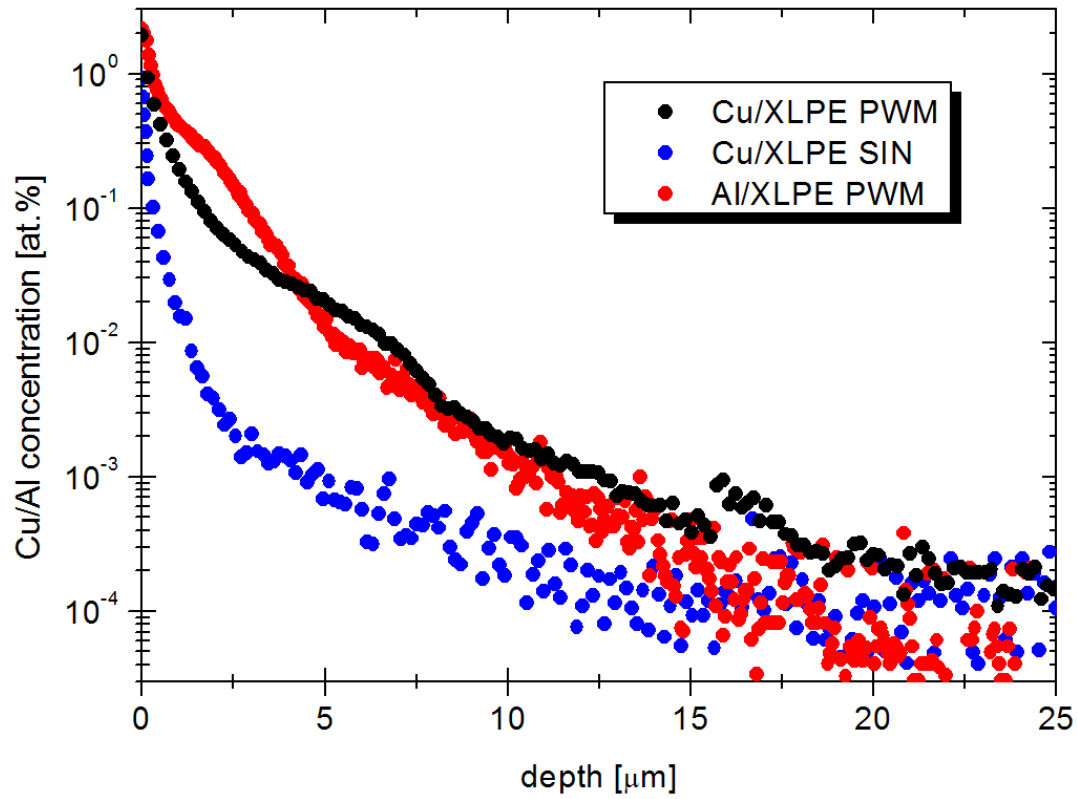
Source: M.Florkowski, B.Forkowska, A.Rybak, P.Zydron, Migration effects at conductor / XLPE interface subjected to partial discharges at different electrical stresses, IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul., Vol. 22, No 1, 2015

Migration at conductor/substrate interface subjected to PD

Cu content SIN vs. PWM



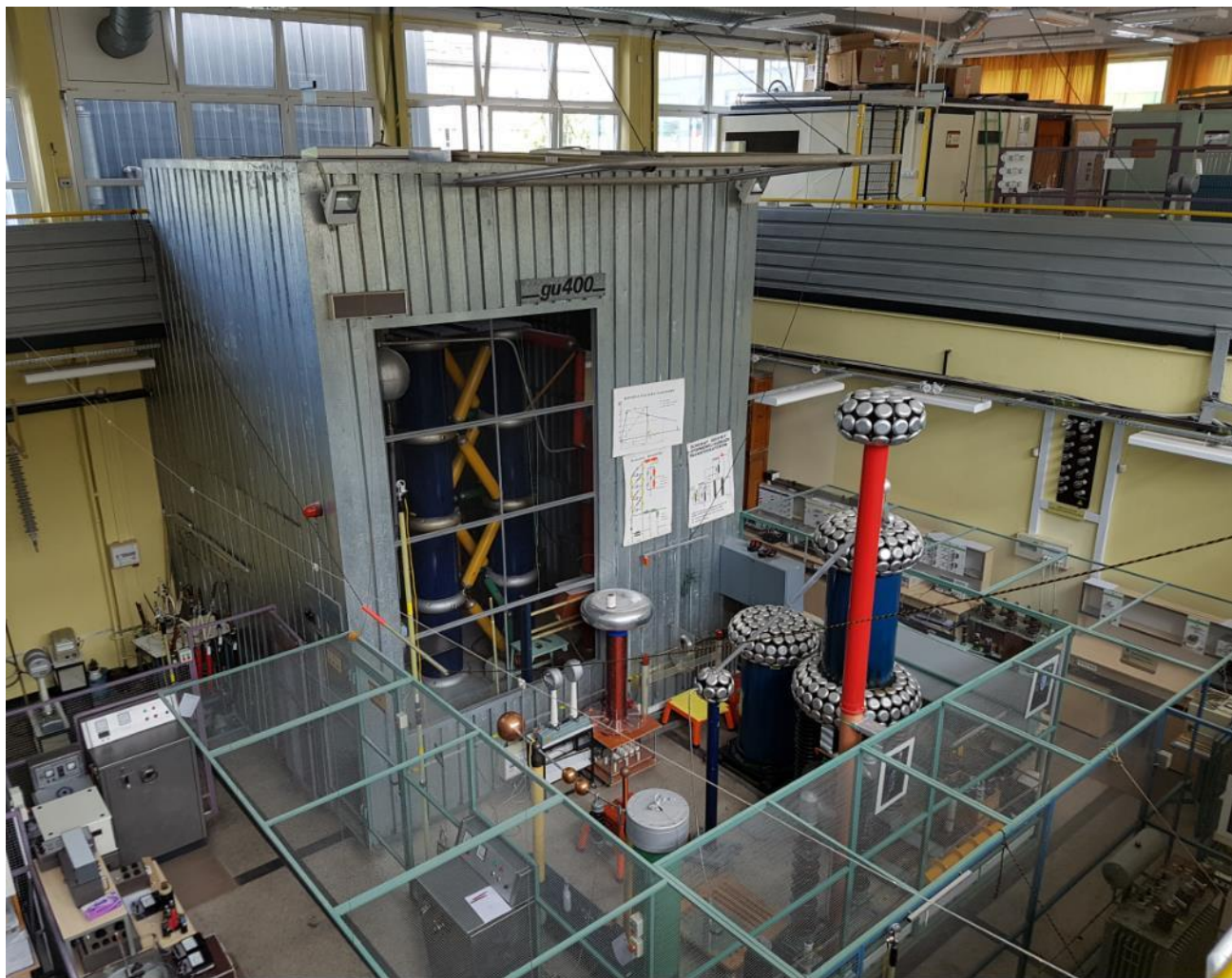
Penetration profiles for Cu and Al rod electrodes



”Metallic treeing”

Source: M.Florkowski, B.Forkowska, A.Rybak, P.Zydron, Migration effects at conductor / XLPE interface subjected to partial discharges at different electrical stresses, IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul., Vol. 22, No 1, 2015

Laboratoria Wysokich Napięć w AGH



Wyniki pochodzą z badań prowadzonych m.in. w Laboratorium Wysokich Napięć w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH

- Narażenia napięciowe: AC, DC, impulsowe PWM, udarowe
- Narażenia eksploatacyjne:
 - zakłócenia i przepięcia
 - wpływ parametrów fizyko chemicznych: ciśnienie / temperatura
 - wpływ harmoniczných wysokiego napięcia
- Procedery i metody znormalizowane i specjalne
- Grupy metod badawczych: optyczne, elektryczne, akustyczne, UHF

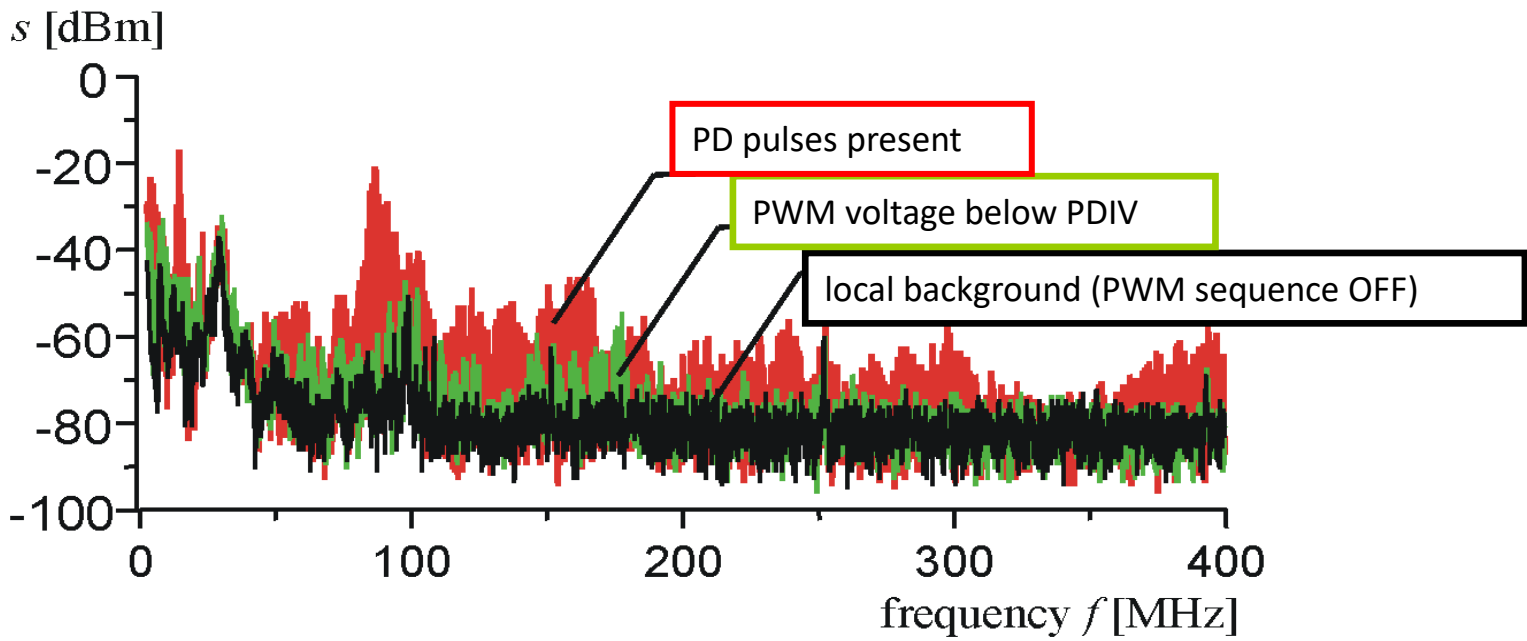
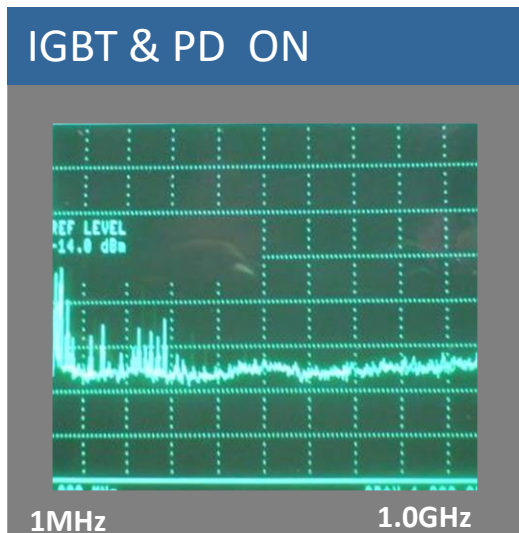
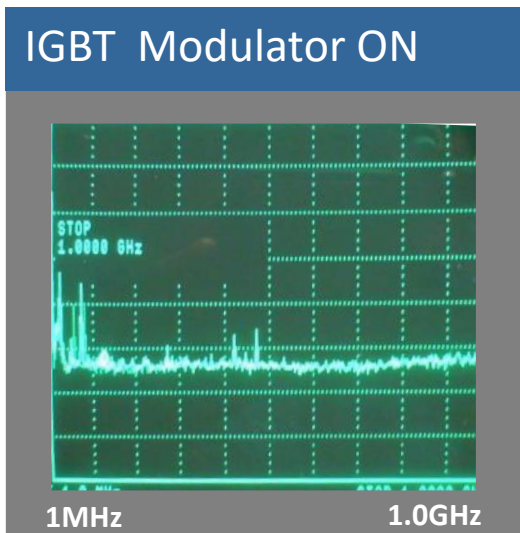
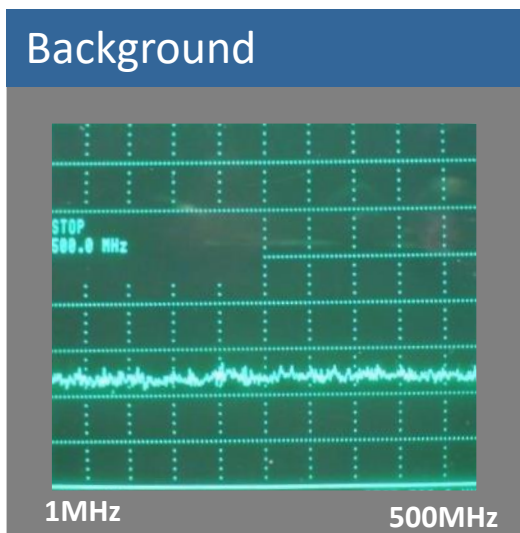
PD at impulse stimuli

- ❑ Rapid development of power electronics resulted in broad spectrum of application areas where HV/MV/LV insulation is involved, e.g.:
 - ❑ HVDC
 - ❑ MV/LV drives and motors
 - ❑ Solar & wind inverters

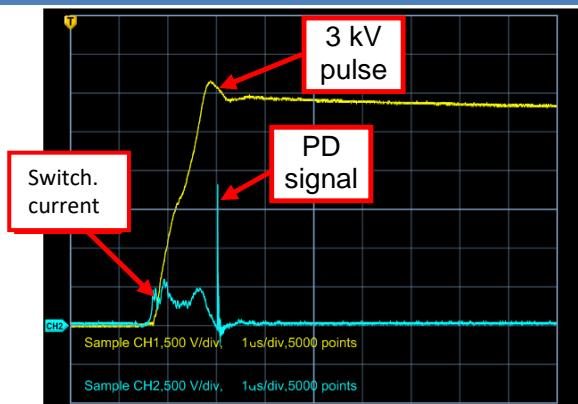
- ❑ The impulse stimulus like PWM (Pulse Width Modulation) creates special challenges on the insulation systems:
 - ❑ repetitive character of the pulses
(usually in **kHz** range)
 - ❑ rapid voltage changes (in **ns - μ s** range)
 - ❑ modulation patterns



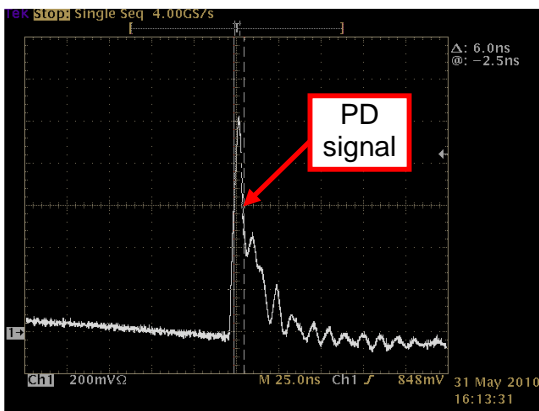
PD spectrum



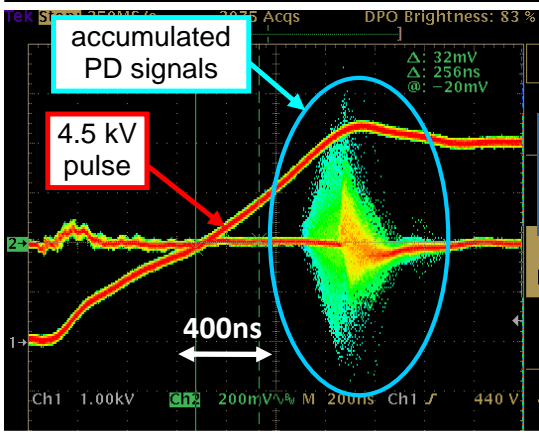
PD detection



switching voltage and PD pulse at 3 kV PWM stimulus (shunt detection)

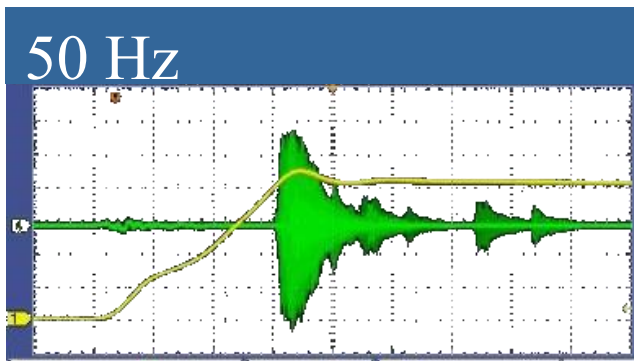


single PD pulse (width 6 ns)



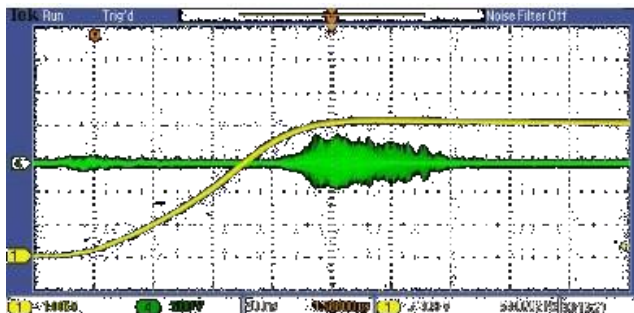
accumulated PD pulses - DPO mode at 4.5 kV VHF antenna detection

Impact of rise time on PD

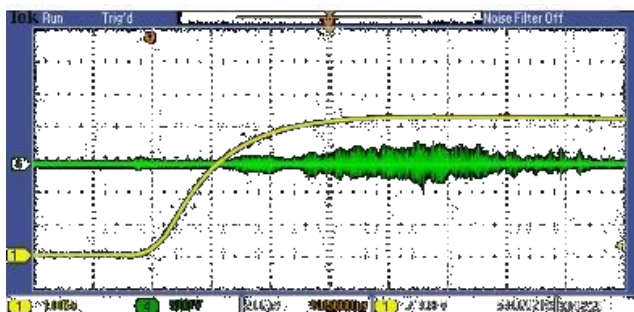


Rise time

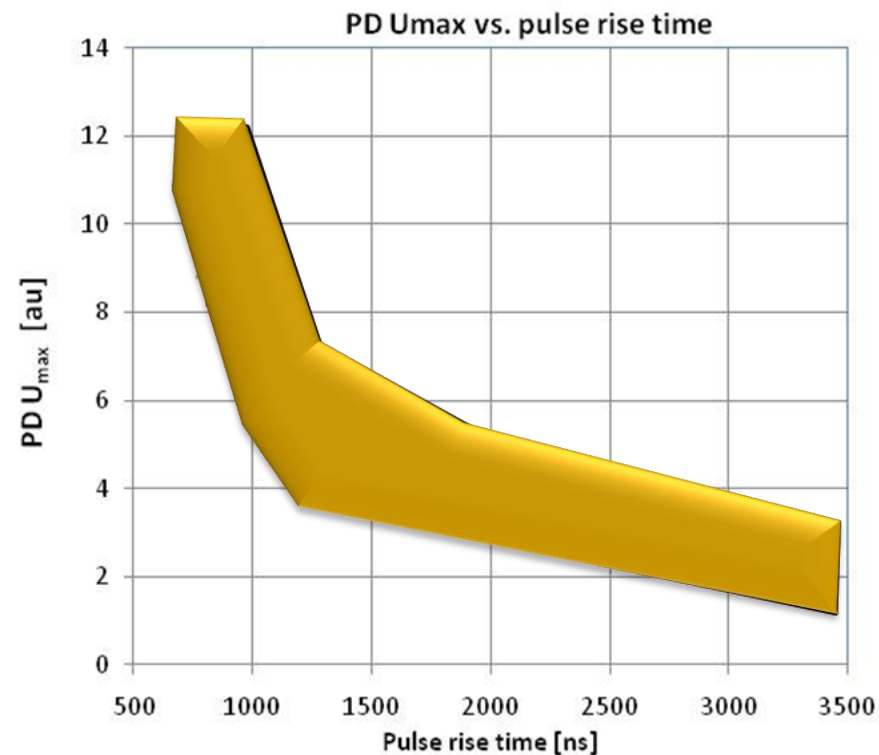
800 ns



1250 ns



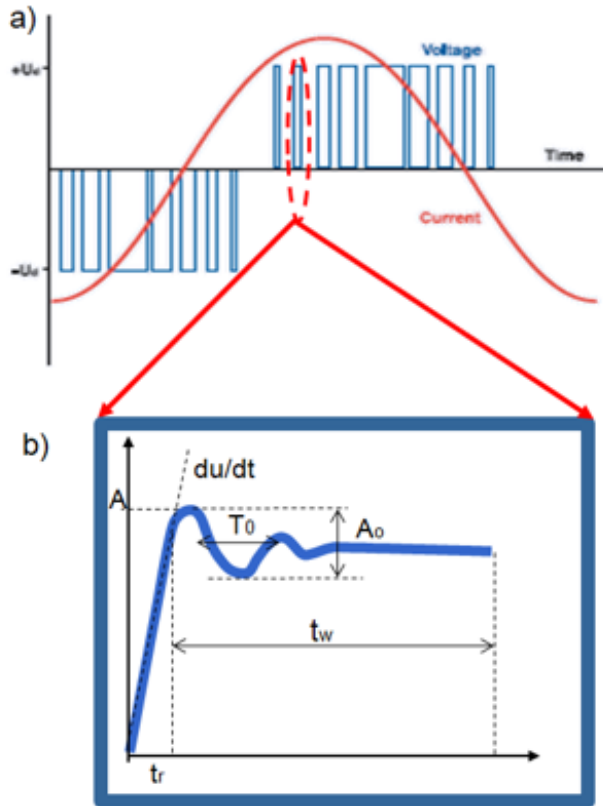
3000 ns



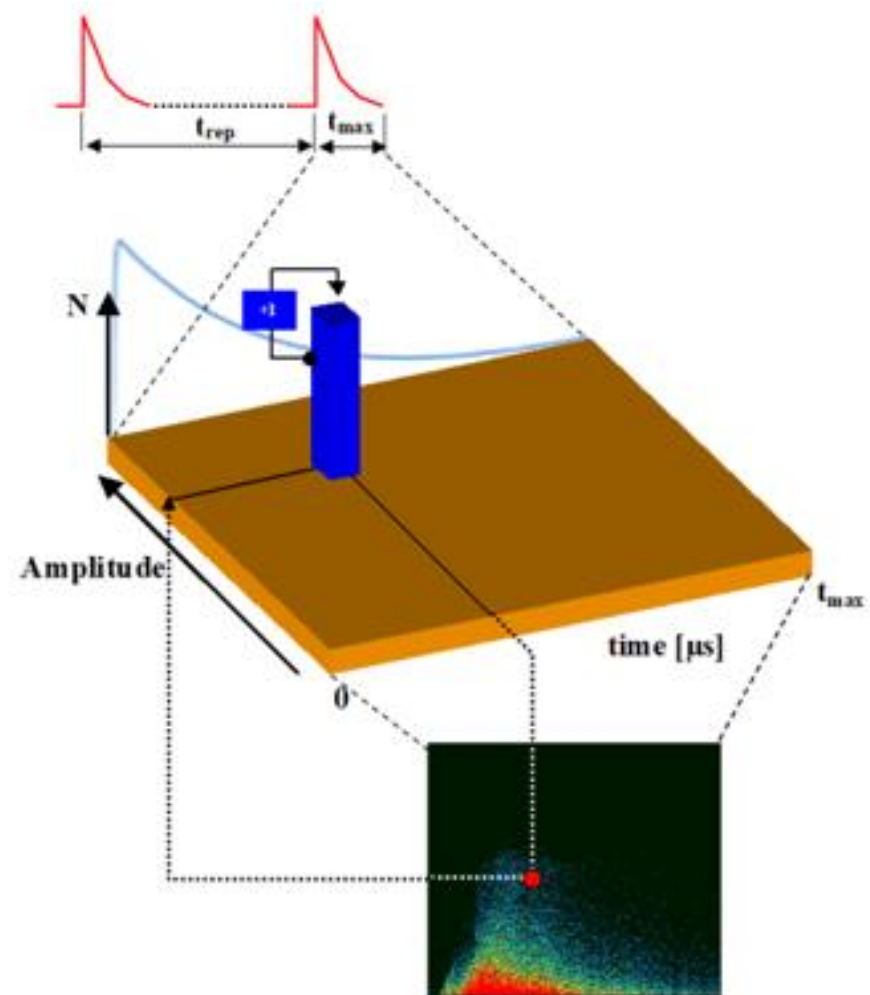
Influence of pulse rise time
on PD magnitude
at positive slope

*(in case of 3000ns the time scale is 2us/div, otherwise 400ns/div)

Wyładowania niezupełne przy napięciu impulsowym

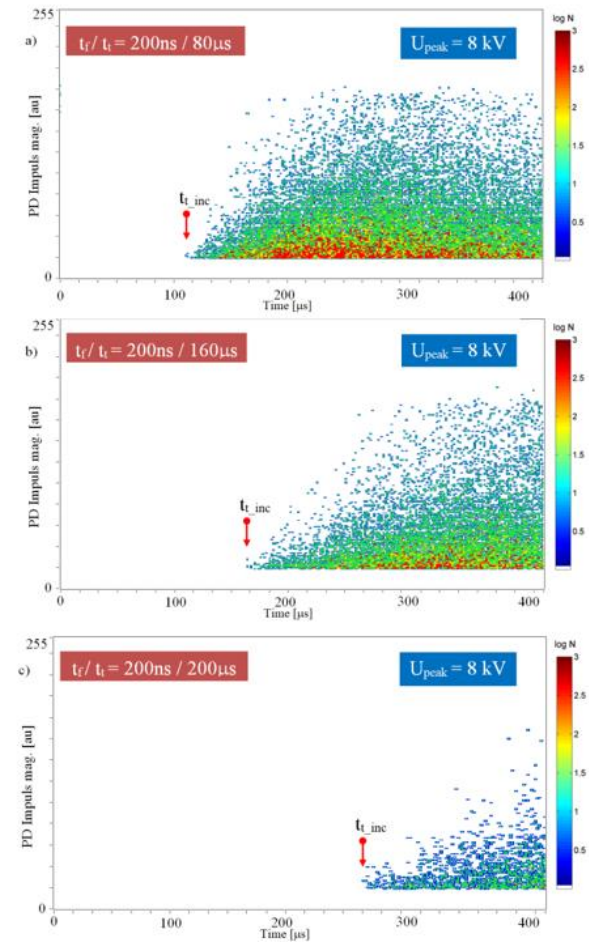
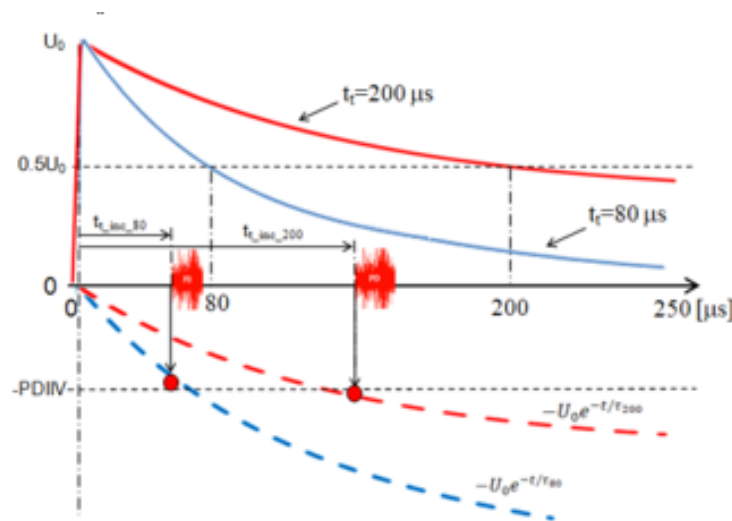
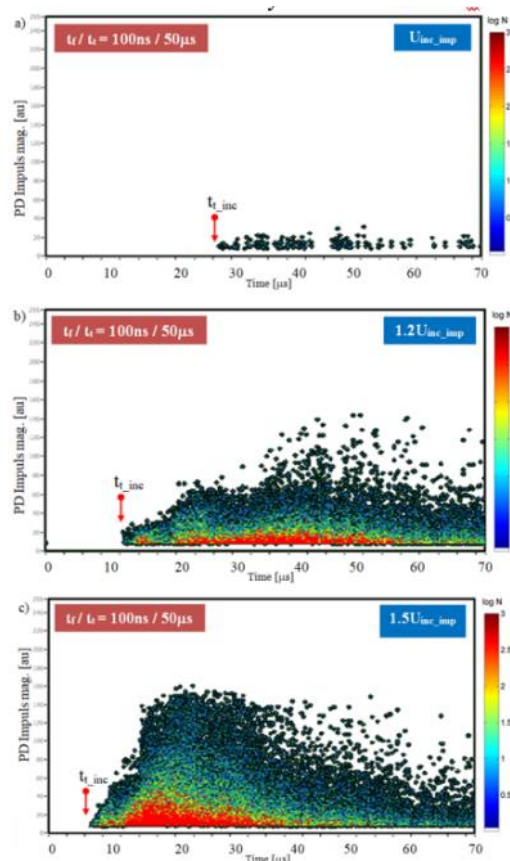


PWM waveform



PD pattern at impulse voltage

Wyładowania niezupełne przy napięciu impulsowym

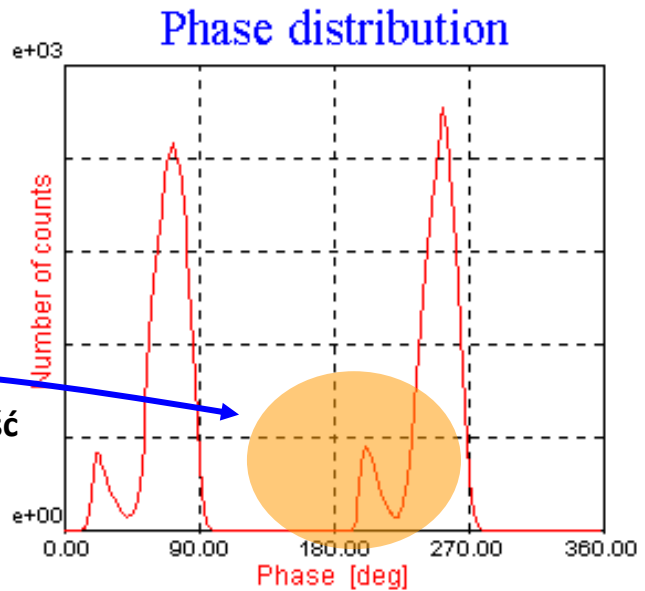
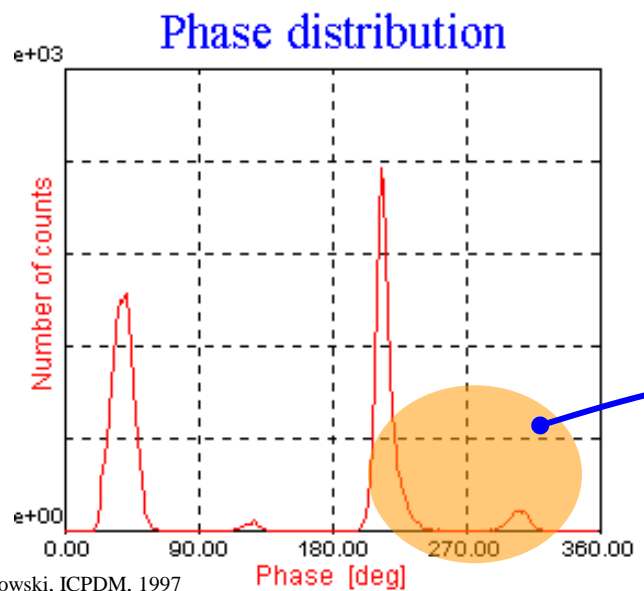
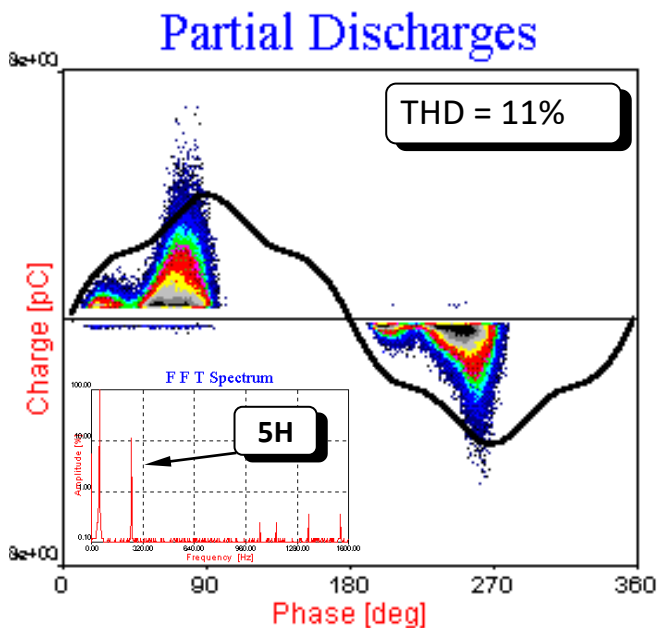
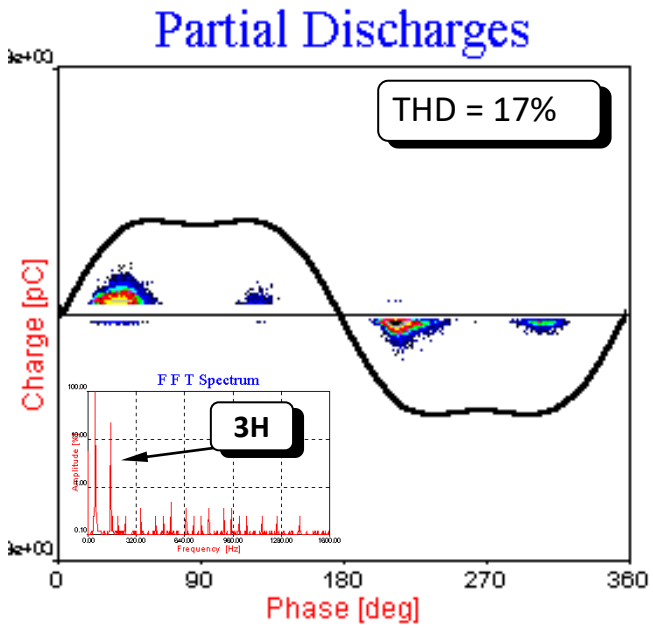


WNZ przy napięciu impulsowym
 $U = \text{var}$

Mechanizm wyładowań na grzbiecie impulsu napięciowego

WNZ przy napięciu impulsowym
 $t_f = \text{var}$

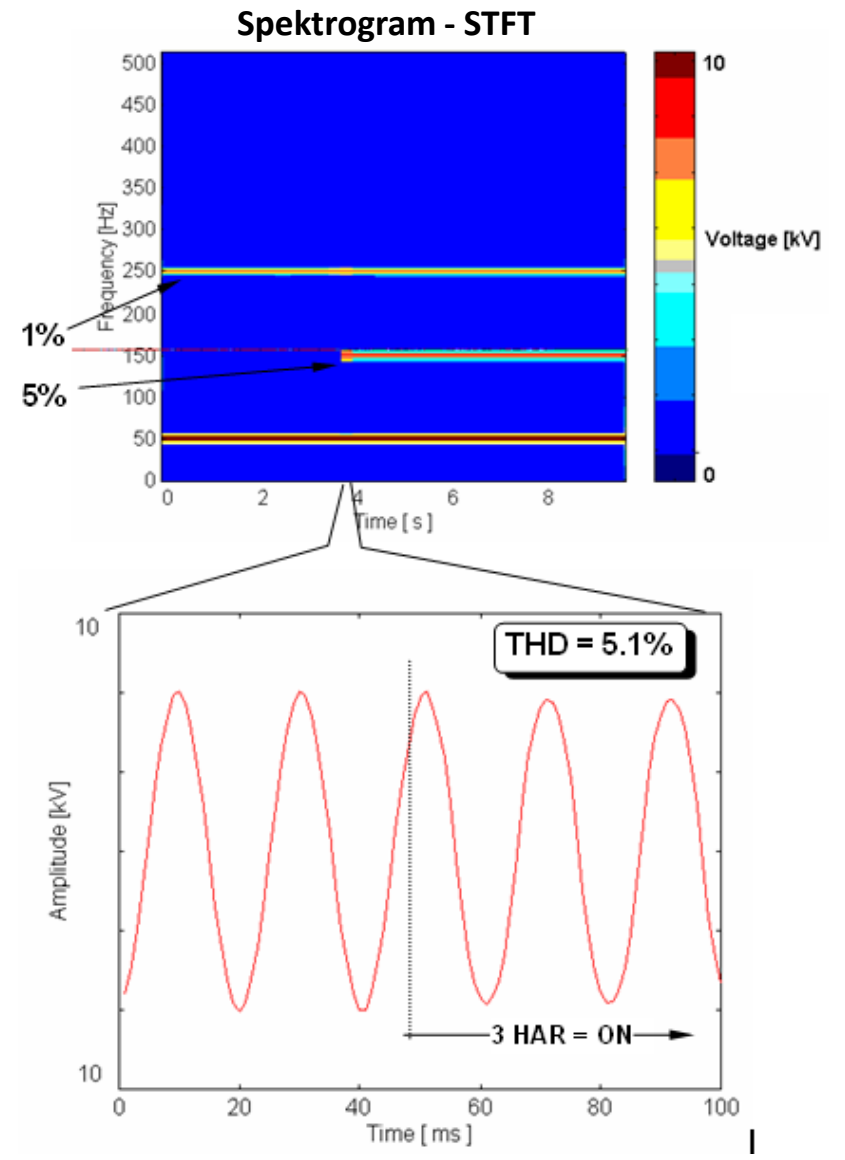
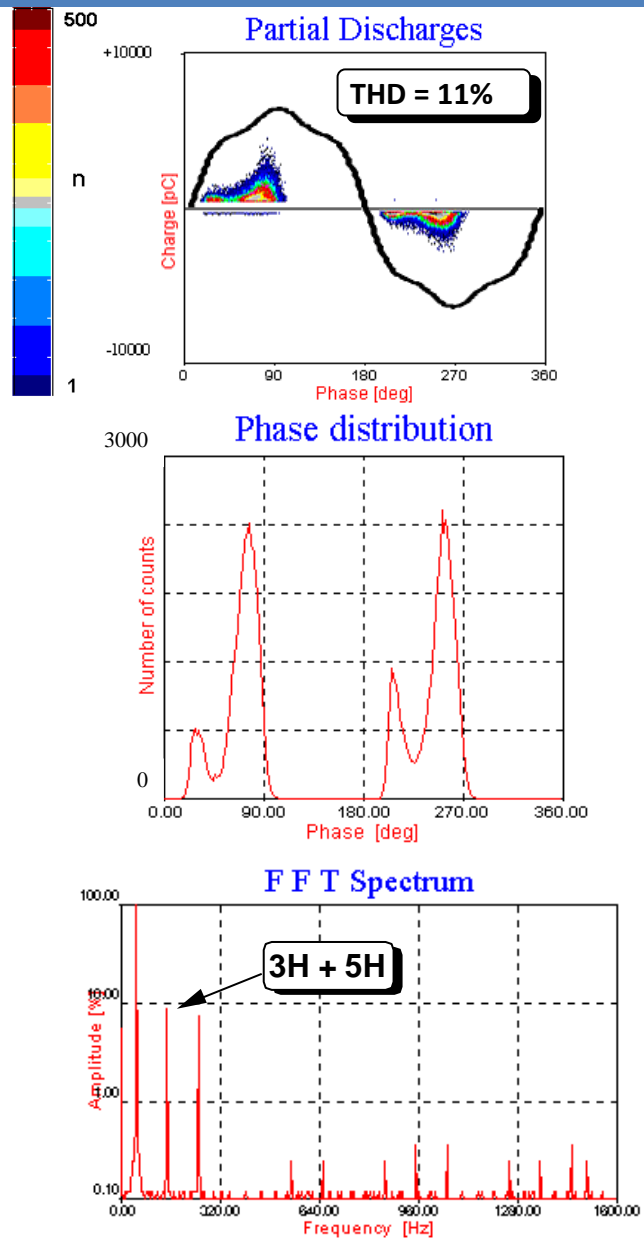
PD: impact of high voltage harmonics



Odwrócona skośność rozkładu

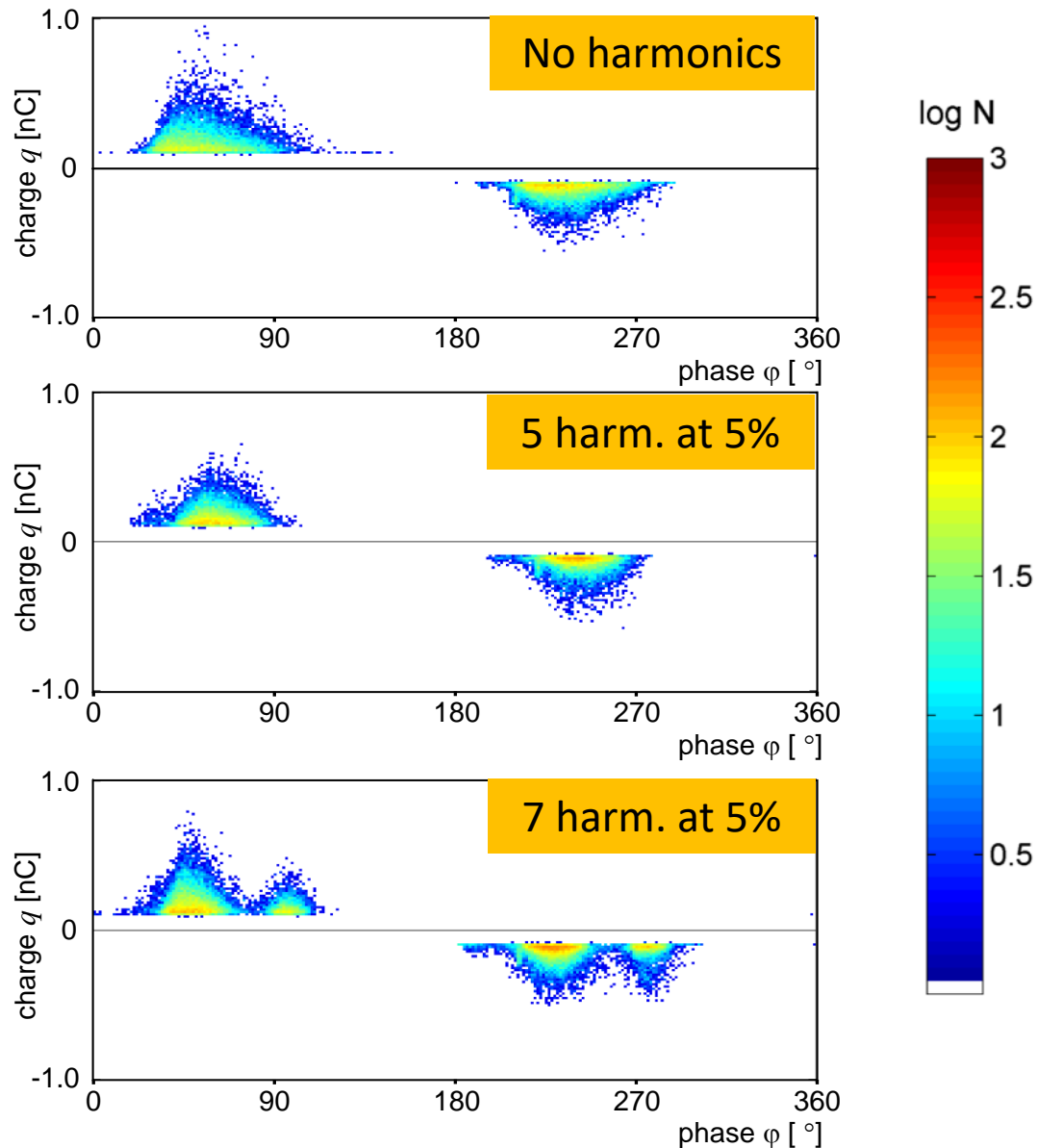
Source: M.Florkowski, ICPDM, 1997

PD: superposition of harmonics in high voltage



3 harmoniczna 4 sekundy po rozpoczęciu akwizycji PD

Interpretation of PD images



Voltage harmonics are **modifying** the PD phase distributions and statistical parameters



Awareness during diagnostic interpretation

PD: HV harmonics at DC

PD measurement methodology at DC voltage containing harmonics

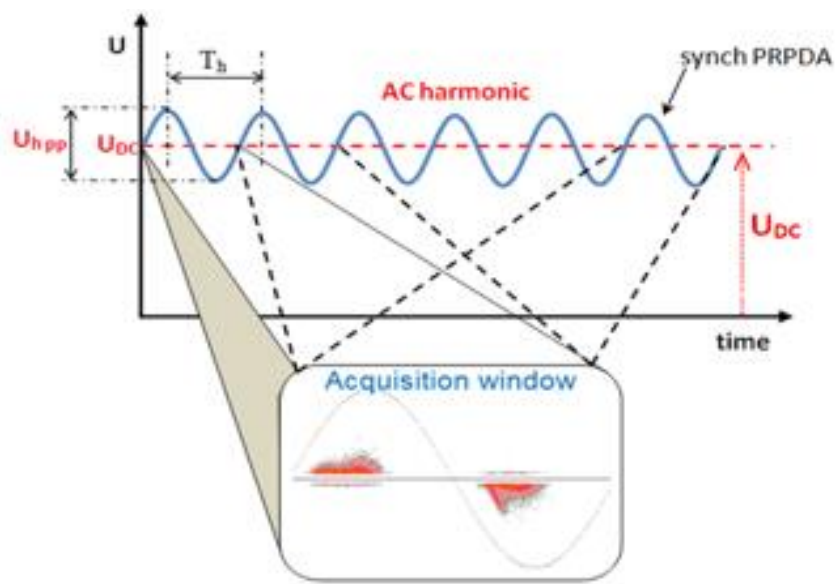
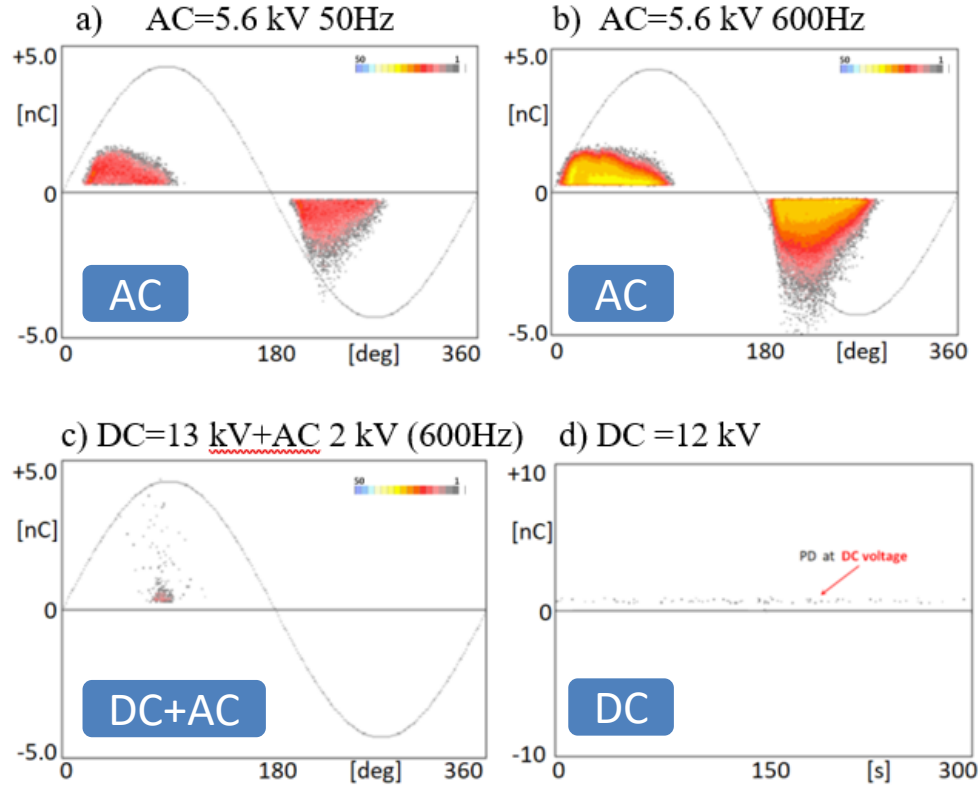


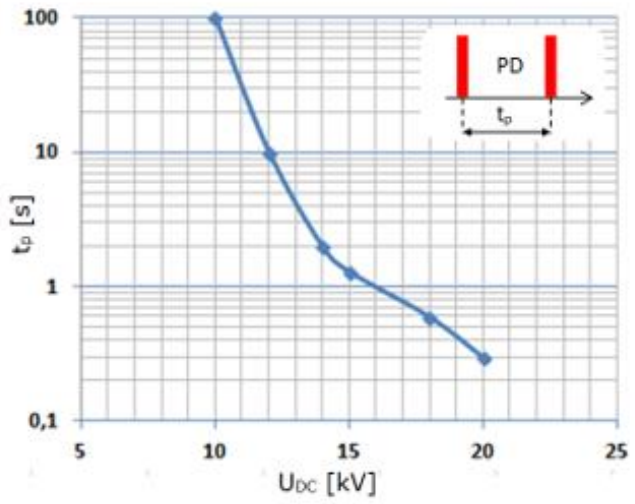
Illustration of acquisition window positioning and synchronization

PD inception voltage U_0



Source: M.Florkowski, M.Kuniewski, P.Zydroń, Partial Discharges in HVDC Insulation with Superimposed AC Harmonics, IEEE Trans. Diel. El. Ins., Vol. 27, No. 6, 2020.

PD: HV harmonics at DC



The DC voltage U relationship of time t_p between consecutive PD pulses.

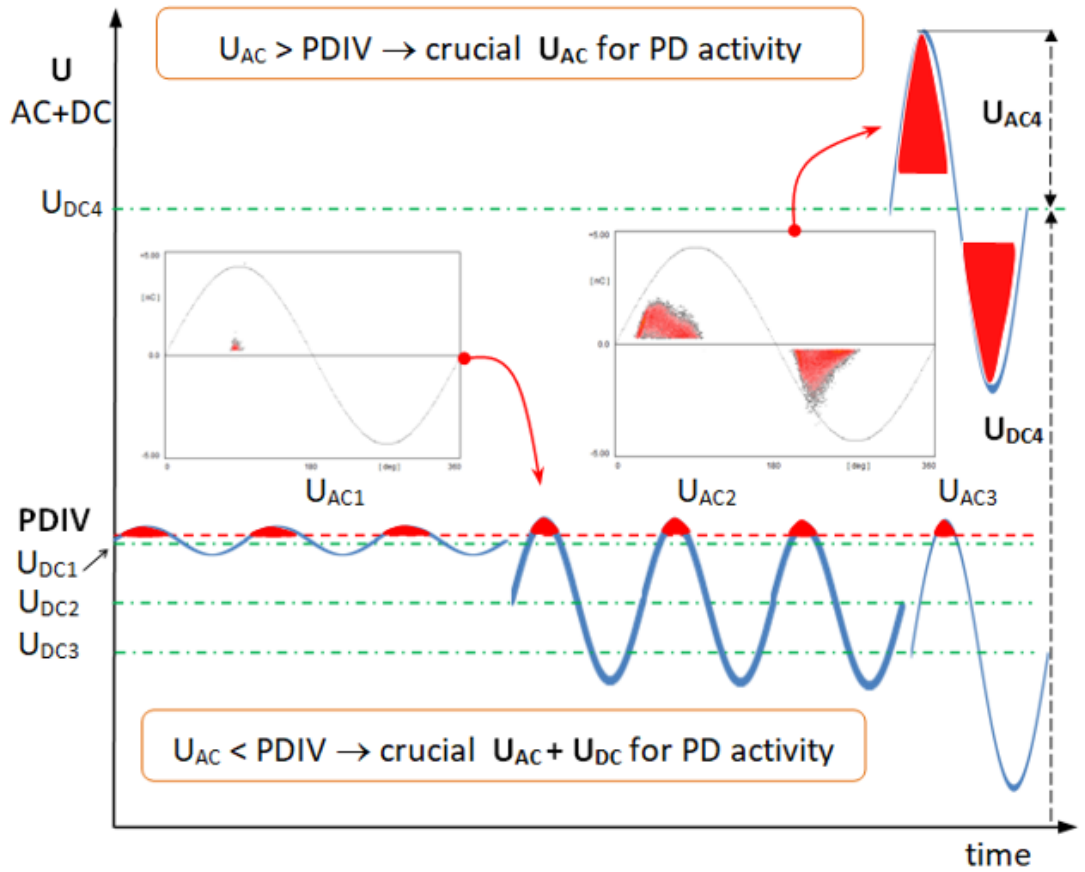


Illustration of an effect of composite DC+AC voltage on PD activity with reference to the PD inception position (PDIV).
 $U_{AC1}, U_{AC2}, U_{AC3}, U_{AC4}$ – magnitude of AC component and corresponding DC voltage level of a composite waveform $U_{DC1}, U_{DC2}, U_{DC3}, U_{DC4}$
 (drawing not in scale, PDIV for sake of clarity on the same level).

Source: M.Florkowski, M.Kuniewski, P.Zydroń, Partial Discharges in HVDC Insulation with Superimposed AC Harmonics, IEEE Trans. Dielect. El. Ins., Vol. 27, No. 6, 2020.

Zakłócenia w pomiarach wnz

Źródła:

- RF & telekom., energoelektronika, ulot (corona)...

Charakterystyka:

- wąsko- /szeroko-pasmowe; wew./zewnątrzne; koherentne z WN

Narzędzia:

W dziedzinie czasu

(bramkowanie fazowe, progowanie)

Korelacja &
Akumulacja (Boxcar)

W dziedzinie częstotliwości

(filtracja analogowo/cyfrowa, FFT)

AI / Sieci neuronowe / ML

Falki
(wavelets)

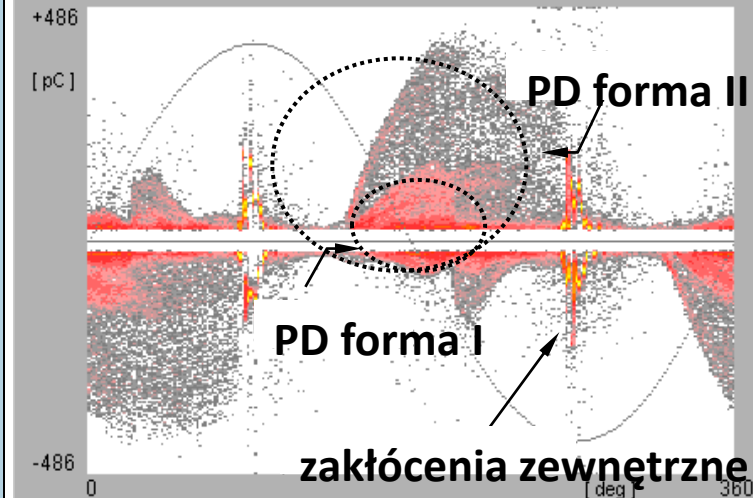
Zakłócenia i detekcja wnz

Detekcja:

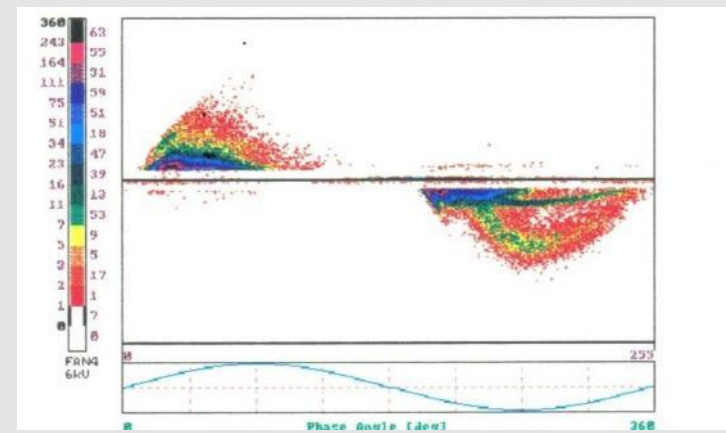
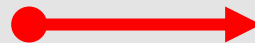
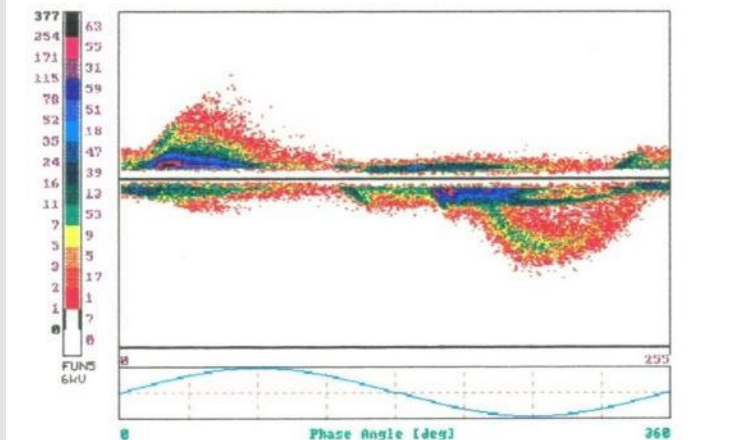
- wąskopasmowa (kHz)
- szerokopasmowa (MHz/ UWD[GHz])
- bazująca na analizie widma (GHz)

Trudność:

- eliminacja/wyodrębnienie zakłóceń w obrazie
- rozróżnienie wył. wewnętrznych i zewnętrznych

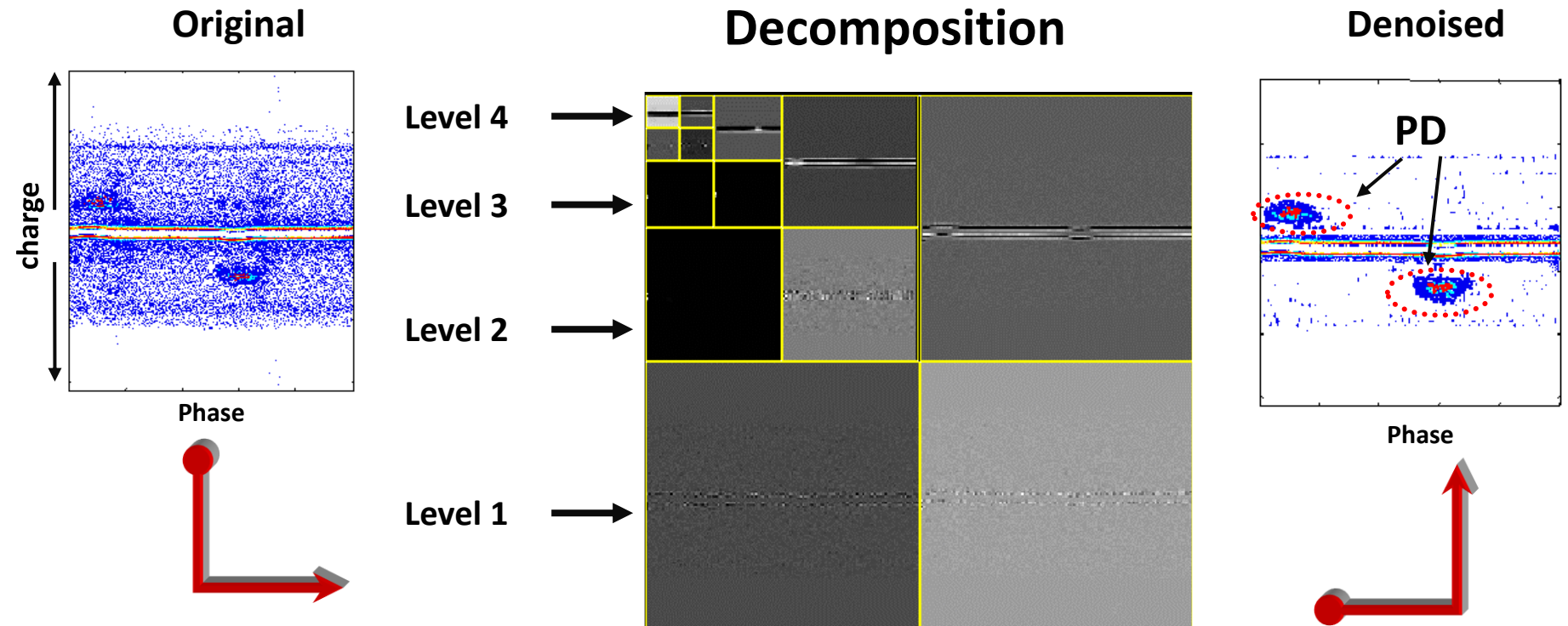


Obrazy PRPD w transformatorze
500MVA / 364kV



Eliminacja niekoherentnych zakłóceń impulsowych, wykorzystując antykoincydencję w czasie rzeczywistym (realizacja sprzętowa)

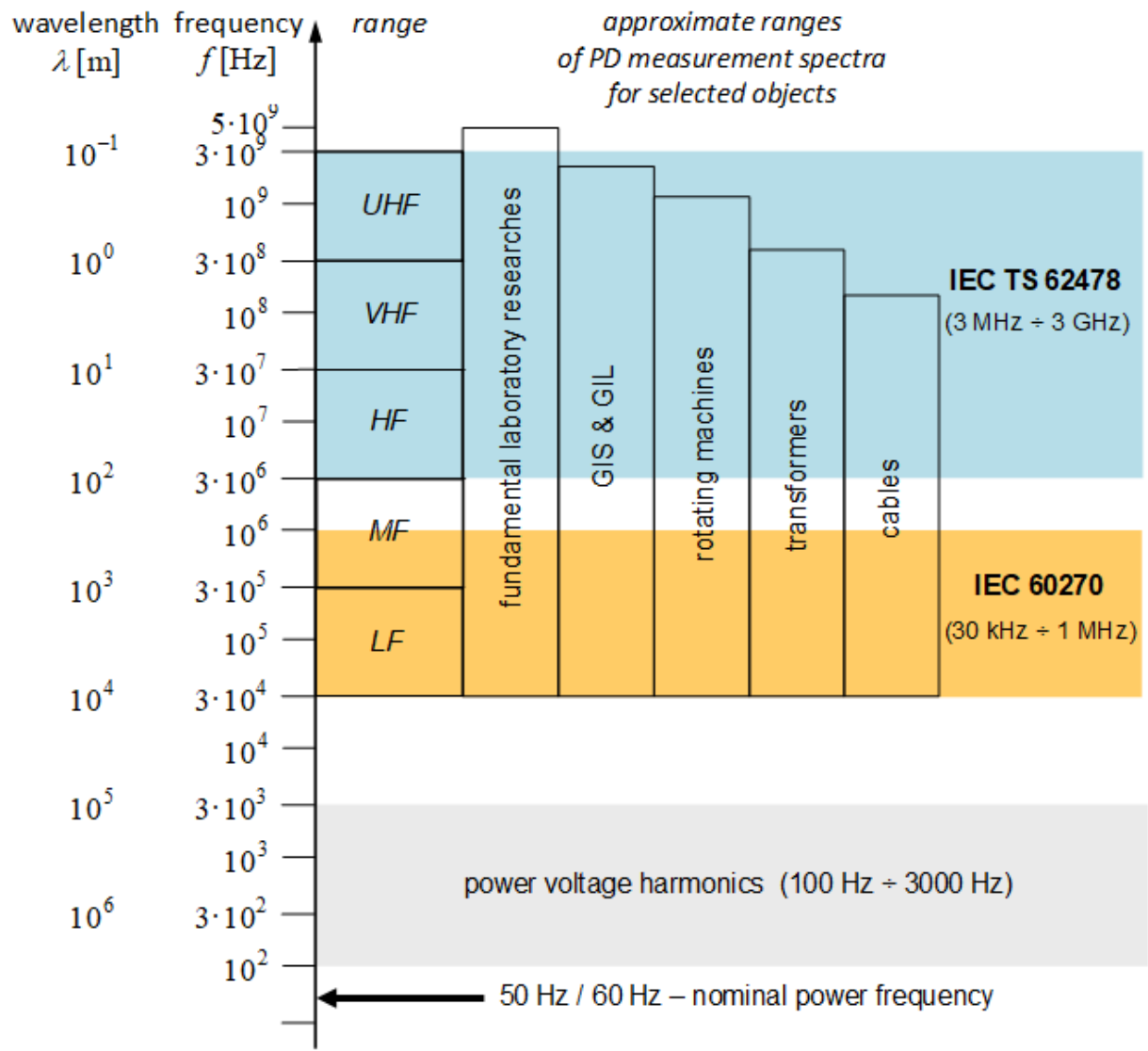
Wavelet based denoising of PD images



- wavelet: **db2**
- soft threshold
- level dependent thresholding (TH1-TH4)

Object: Motor 6kV/ 200kW

Partial discharge detection spectra in different objects



UHF – ultra-high frequency; VHF – very high frequency; HF – high frequency; MF – medium frequency; LF – low freq.

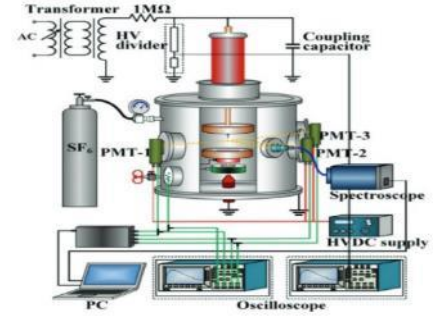
PD object tailored diagnostic methods

Methods

Objects

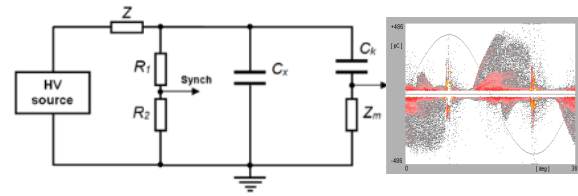
Optical PD detection

GIS / GIL



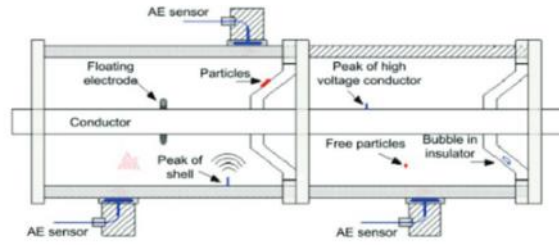
Electrical PD detection

ALL objects



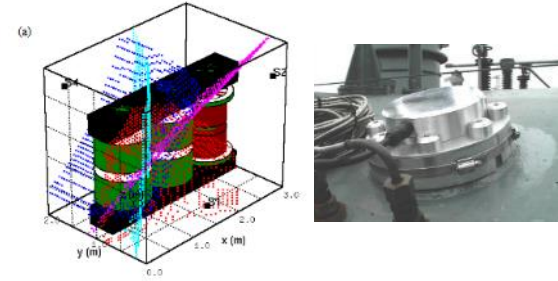
**Acoustic
(localization / triangulation)**

GIS / Transformers



**UHF
(Ultra High Frequency)**

GIS, Transformers



Photos: M.Judd, EIC 2011; Q.Khan, IEEE EIM 2019.

PODSUMOWANIE

- **Wyładowania niezupełne to dziedzina multidyscyplinarna**
- **Współczesna diagnostyka oparta jest na komplementarnych metodach badawczych**

Kierunki prac w dziedzinie wyładowań niezupełnych:

- mechanizmy fizykalne wnz w silnym polu elektrycznym
- nowe materiały elektroizolacyjne, w tym nanomateriały
- metody detekcji, przetwarzania i analizy wnz
- diagnostyka i zespół zagadnień analityki opartej na wnz

Wyładowania niezupełne towarzyszą rozwojowi konstrukcji wysokonapięciowych układów izolacyjnych obiektów w elektroenergetyce

Rozwój konstrukcji urządzeń dla wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej był możliwy dzięki postępowi w Technice Wysokich Napięć



Dziękuję uprzejmie za uwagę