



Barbara Florkowska\*, Marek Florkowski\*, Paweł Zydroń\*

## **ANALIZA WYŁADOWAŃ ULOTOWYCH NA PODSTAWIE OBRAZÓW FAZOWO-ROZDZIELCZYCH**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono badania form wyładowań generowanych przez lokalne ich źródła na powierzchni przewodu w obecności ulotu elektrycznego, przy zastosowaniu metody rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych. Istnieje możliwość korelacji form wyładowań i obrazów fazowo-rozdzielczych dla celów diagnostyki linii przesyłowych WN.

**Słowa kluczowe:** ulot, linie napowietrzne, diagnostyka, zakłócenia elektromagnetyczne, kompatybilność elektromagnetyczna

### **1. Wstęp**

Wyładowania elektryczne na przewodach fazowych linii napowietrznych i osprzętu należą do zespołu problemów eksploatacyjnych linii przesyłowych WN. Uszkodzenia np. przewodów, łańcuchów izolatorów, stwarzają warunki dla lokalnych wyładowań elektrycznych, przy czym od rodzaju źródeł wyładowań zależą formy ich rozwoju ograniczone ładunkiem przestrzennym, jak np.:

- wyładowania ulotowe świetlące (*corona*) na przewodach linii;
- lokalne snopienie w miejscach uszkodzeń przewodów lub na osprzęcie;
- wyładowania powierzchniowe na izolatorach liniowych;
- wyładowania wewnętrzne w izolacji stałej.

Strefę jonizacji, powstawania ładunku przestrzennego i formowania impulsów prądowych reprezentuje pojemność odcięta znaczną impedancją od źródła napięcia o częstotliwości sieciowej, a jej nagłe rozładowanie powoduje impulsy prądowe i zakłócenia elektromagnetyczne. Powyższe formy wyładowań charakteryzują impulsy prądowe

---

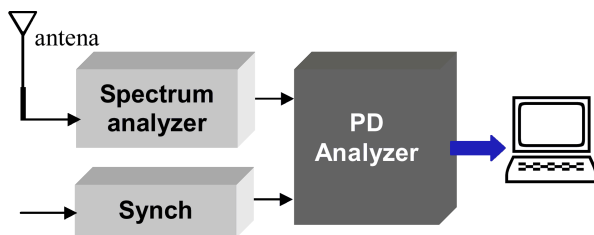
\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

zlokalizowane w różnych zakresach fazowych napięcia probierczego, posiadające różny kształt i wartości szczytowe, przy czym szczególne znaczenie posiada stromość impulsu. Otoczenie elektrody ulotowej w silnym polu elektrycznym jest obszarem luminescencji oraz fotojonizacji. Zagadnienie detekcji wyładowań ulotowych ma wielorakie znaczenie. Z jednej strony wymienionym już obiektem zainteresowań są linie napowietrzne WN oraz występujące w nich defekty stanowiące źródła wyładowań. Z drugiej natomiast efekt ulotu odpowiedzialny jest za zakłócenia elektromagnetyczne (EMI — *Electromagnetic Interference*) pochodzące od linii czy aparatów podstacji wysokiego napięcia. Ta grupa zagadnień związana jest z coraz bardziej istotną problematyką kompatybilności elektromagnetycznej. Poza szerokopasmowymi zakłóceniami elektromagnetycznymi wysokiej częstotliwości [1, 7, 8] dodatkowym efektem ulotu są zakłócenia akustyczne [2]. Zakłócenia elektromagnetyczne mierzone i badane są powszechnie od lat sześćdziesiątych miernikami zakłóceń radioelektrycznych — zwykle w zakresie częstotliwości rzędu  $10^0$ – $10^1$  MHz, wąskopasmowo wg wymagań odpowiednich norm krajowych i międzynarodowych. Rozwinięciem metod oceny ulotu w liniach napowietrznych na podstawie pomiaru zakłóceń radioelektrycznych są badania wykonywane ze śmigłowców z zastosowaniem detekcji radiowej i identyfikacji defektów w liniach w oparciu o deformacje krzywych Lissajou [3].

Przedstawiona metoda rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych impulsów zakłóceń elektromagnetycznych umożliwia detekcję źródeł wyładowań elektrycznych na elementach WN w powietrzu w oparciu o informacje zawarte w obrazach, a więc rozpoznawanie wymienionych wcześniej form wyładowań.

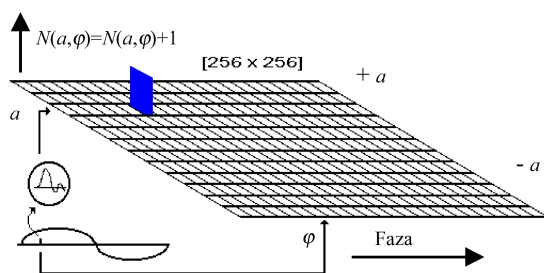
## 2. Technika pomiarowa

Konwencjonalna aparatura do pomiaru zakłóceń od wyładowań ulotowych bazuje na miernikach zakłóceń radioelektrycznych działających w paśmie do kilkudziesięciu MHz, co wynika z wymagań określonych w odpowiednich normach [4, 5]. Są to pomiary selektywne z wykorzystaniem mierników wartości quasi-szczytowej detektowanego sygnału wąskopasmowego (standardowa szerokość pasma 9 kHz). Z drugiej strony widmo częstotliwościowe ulotu w zależności od rodzaju jego źródła, warunków atmosferycznych itp. może obejmować o wiele wyższe zakresy częstotliwości. W badaniach ulotu elektrycznego i wyładowań generowanych przez modelowane defekty zastosowano aparaturę pomiarową w konfiguracji przedstawionej na rys. 1.



**Rys. 1.** Schemat konfiguracji aparatury pomiarowej do rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych impulsów zakłóceń ulotowych

W skład zestawu wchodzi: 1) antena, 2) analizator widma, 3) układ synchronizacji rejestracji, 4) analizator impulsów wyładowań, 5) komputer nadzorczy wraz z niezbędnym oprogramowaniem. W pierwszym kroku przeprowadzany jest pomiar wstępny sygnału z anteny w bardzo szerokim paśmie częstotliwości (do kilkuset MHz) dla wykrycia zakresów częstotliwości zakłóceń związanych z występującym ulotem. Na tej podstawie określana jest częstotliwość pomiarowa. W kolejnym kroku analizator widma jest ustawiany w tryb pracy tzw. zerowego rozciągu („zero span”), tzn. dla wybranej selektywnej częstotliwości. Równocześnie czas analizy sygnału tej częstotliwości jest synchronizowany do okresu wysokiego napięcia (napięcia sieci). Dzięki temu istnieje możliwość wykrycia występowania wybranej składowej widma — koherentnej z wysokim napięciem, będącym źródłem generującego ją ulotu. Zastosowanie rejestratora fazowo-rozdzielczego impulsów wysokiej częstotliwości (stosowanego w pomiarach wyładowań niepełnych) na wyjściu analizatora widma pozwala na uzyskanie informacji o amplitudzie i fazie pojawiających się zakłóceń ulotowych. Technika ta poprzez swą selektywność i synfazowość (określenie położenia fazowego zakłóceń względem okresu napięcia 50 Hz) pozwala na rozróżnienie występujących lokalnie zakłóceń elektromagnetycznych i wyładowań ulotowych. Obrazy fazowo-rozdzielcze są tworzone jako odwzorowanie liczby występujących w czasie pomiaru impulsów zakłóceń o określonej amplitudzie i na określonej fazie. W efekcie uzyskuje się trójwymiarowe rozkłady  $D(a, \varphi, n)$  w przestrzeni amplituda–faza–liczba. Odpowiadają one akumulowaniu informacji o impulsach zakłóceń w macierzy  $N(a, \varphi)$ , w której wiersze reprezentują fazę napięcia  $\varphi$ , kolumny amplitudę impulsu  $a$ , zaś zawartość elementu macierzy przedstawia liczbę impulsów  $n$ . Dla celów wizualizacji tych obrazów liczba wyładowań jest kodowana w postaci palety kolorów lub stopni szarości.



Rys. 2. Graficzna interpretacja macierzy  $N(a, \varphi)$

Na rys. 2 przedstawiono graficzną interpretację macierzy  $N(a, \varphi)$ . Akumulowane z rozdzielczością fazową obrazy impulsów zakłóceń ulotowych umożliwiając, w odróżnieniu od metody klasycznej, separacje odmiennych rodzajów zakłóceń. W szerokopasmowych pomiarach wyładowań niepełnych metoda umożliwia określenie biegunowości poszczególnych impulsów. Przy pomiarze zakłóceń ulotowych występują zarówno impulsy o amplitudzie dodatniej, jak i ujemnej, co znajduje odzwierciedlenie na rejestrowanym obrazie fazowo-rozdzielczym.

W opisywanych badaniach do detekcji sygnału ulotu zastosowano szerokopasmową antenę prętową połączoną z analizatorem widma HP8591E firmy Hewlett-Packard, umożliwiającym pracę w zakresie od 9 kHz do 1,8 GHz. Do rejestracji impulsów za-

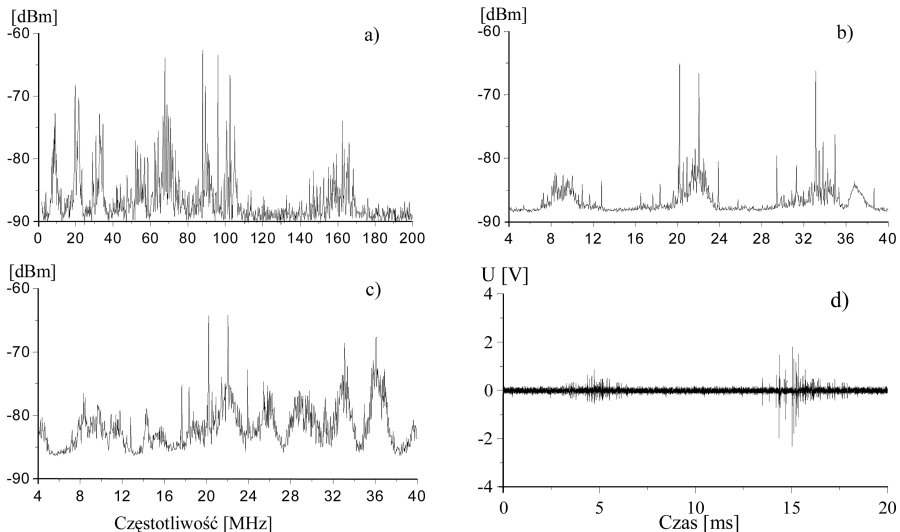
kłóceń użyto systemu rejestracji wyładowań niepełnych PDA [6]. W systemie tym można wyróżnić moduły: 1) przetwarzający amplitudę impulsów, 2) synchronizacji, 3) eliminacji zakłóceń oraz 4) transmisji danych pomiarowych.

Przetwornik analogowo-cyfrowy amplitudy impulsu w torze sygnałowym może pracować w jednym z dwóch trybów:

- Tryb I: *detekcji pierwszego maksimum*, w którym programowalny czas martwy w zakresie ( $1\mu\text{s}$ – $1\text{ms}$ ) jest dobierany w zależności od kształtu impulsów wejściowych, w celu wyeliminowania wielokrotnych konwersji sygnałów oscylacyjnych;
- Tryb II: *detekcji w oknie czasowym*, który zapewnia przetwarzanie największej amplitudy występującej w zadanym czasie ( $1\mu\text{s}$ – $1\text{ms}$ ).

Tor synchronizacji umożliwia pomiar z rozdzielczością fazową poprzez podział okresu wysokiego napięcia na 256 równych kanałów czasowych (fazowych) i synchroniczne powtarzanie kolejnych okresów rejestracji. Dzięki zastosowaniu pamięci dwuportowej DPRAM możliwa jest rejestracja impulsów zakłóceń w czasie rzeczywistym z równoczesną, niezależną transmisją danych do komputera nadzorującego pomiary.

Na rys. 3 przedstawiono charakterystyczne etapy przetwarzania sygnału z anteny. Strojenie aparatury rozpoczyna się od pomiaru w szerokim paśmie częstotliwości (rys. 3a). Następnie określone są częstotliwości związane z zakłóceniem ulotowym (rys. 3b i 3c). Po wybraniu częstotliwości pomiarowej analizator widma jest przełączany w opisany tryb „zero-span”. Sygnał napięciowy wybranej częstotliwości synchronizowany z napięciem sieci jest po wzmacnieniu (rys. 3d) podawany na wejście przetwornika systemu PDA. Wynikiem rejestracji są obrazy fazowo-rozdzielcze impulsów zakłóceń.

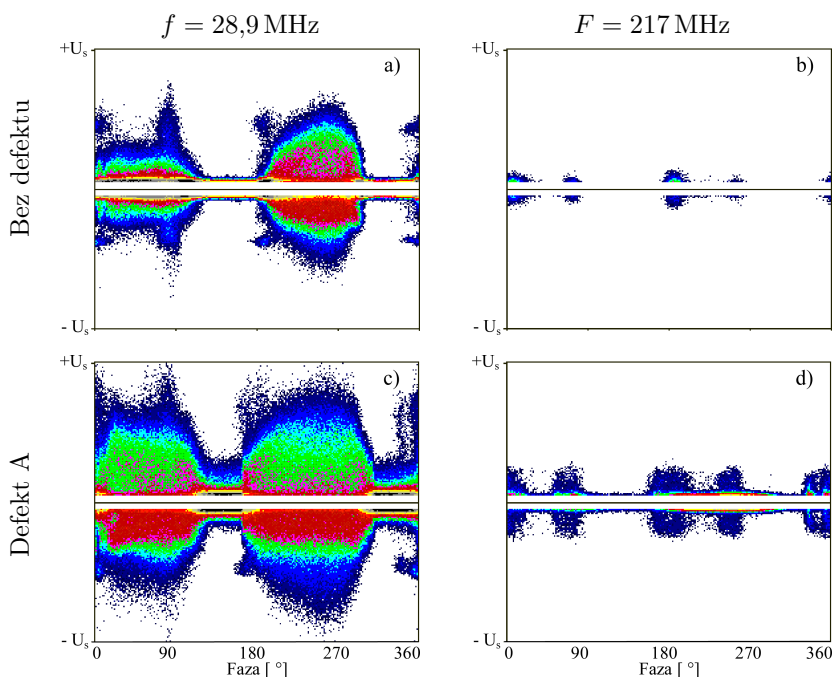
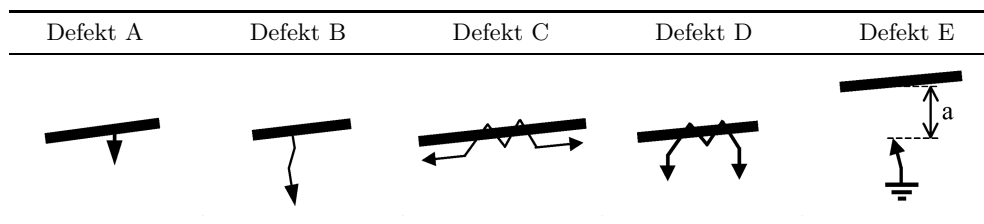


**Rys. 3.** Kolejne etapy selekcji i przetwarzania sygnałów zakłóceń ulotowych: a) widmo z ulotem —  $\Delta f = 200\text{ MHz}$ ,  $U = 75\text{ kV}$ ; b) widmo bez ulotu  $\Delta f = 40\text{ MHz}$ ; c) widmo z ulotem —  $\Delta f = 40\text{ MHz}$ ,  $U = 75\text{ kV}$ ; d) sygnał zakłóceń ulotowych dla częstotliwości  $35,86\text{ MHz}$  synchronizowany z napięciem sieci

### 3. Wyniki badań

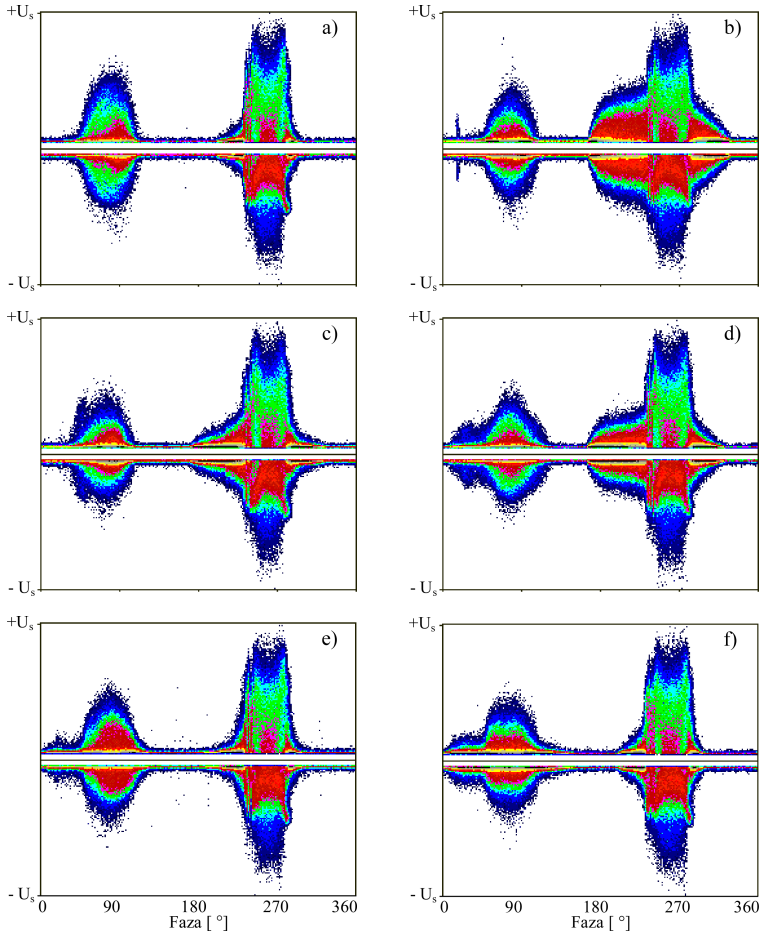
W laboratoryjnych badaniach modelowych na odcinku linii napowietrznej przy napięciu przemiennym, stosowano na tle ulotu elektrycznego dodatkowe źródła wyładowań na linii (typ A, B, C, D, E) dające efekty snopienia (tabela 1). Towarzyszące im impulsy prądowe wywołują zakłócenia w szerokim zakresie częstotliwości od ok. 100 kHz do ponad 1000 MHz. Sygnały wysokiej częstotliwości generowane przez snopienie charakteryzuje bardzo krótki czas trwania i duże intensywności. Ich zbiory tworzą grupy w każdej połowie okresu napięcia sieci.

**Tabela 1.** Modelowe źródła dodatkowych wyładowań (defekty)



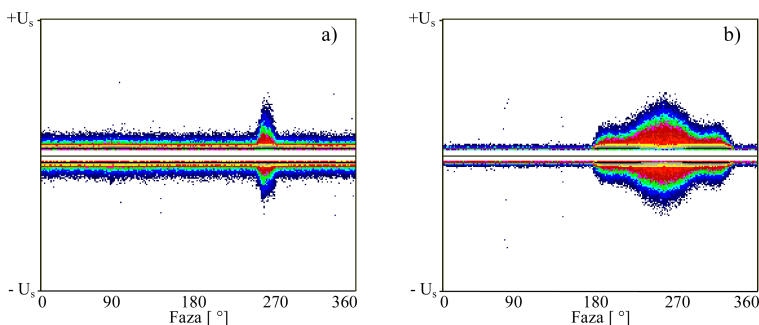
**Rys. 4.** Obrazy fazowo-rozdzielcze zakłóceń przy  $U = 110$  kV mierzone na dwóch różnych częstotliwościach: a), b) — ulot elektryczny, c), d) dodatkowe źródło wyładowań (A)

Stosując analizator widma wykonano pomiary dla różnych częstotliwości pomiarowych, a wybrane wyniki pomiarów przedstawiono na kolejnych rysunkach zawierających obrazy rejestrowanych impulsów zakłóceń. Na rys. 4 pokazano wpływ wyboru częstotliwości pomiarowej na rejestrowany obraz ulotu. W obu przypadkach, zarówno dla częstotliwości niskiej (28,9 MHz), jak i wysokiej (217 MHz), występujący defekt powoduje istotną zmianę obrazu.



**Rys. 5.** Obrazy fazowo-rozdzielcze zakłóceń przy  $U = 75 \text{ kV}$ ,  $f = 35,86 \text{ MHz}$  a) ulot elektryczny; dodatkowe źródła wyladowań: b) B, c) C, d) D, e) E ( $a = 1,2 \text{ m}$ ), f) ( $a = 0,6 \text{ m}$ )

Rys. 5 przedstawia wyniki rejestracji dla wybranej częstotliwości pomiarowej przy jednakowym napięciu, dla różnych rodzajów defektów. Każdy z defektów powoduje wygenerowanie innego, charakterystycznego obrazu fazowego zakłóceń. Daje to podstawę do stwierdzenia możliwości skorelowania wyników pomiaru z typem występującego defektu.



**Rys. 6.** Obrazy fazowo-rozdzielcze zakłóceń przy  $U = 40$  kV,  $f = 35,86$  MHz: a) ulot elektryczny, b) źródło wyładowań (B)

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów przy napięciu 40 kV. Przy braku dodatkowego źródła wyładowań rejestrowano niewielkie zakłócenia w drugiej połowie okresu napięcia sieci (rys. 6a), natomiast jego obecność (typ B) spowodowała zwiększenie zarówno zakresu fazowego, jak i amplitudy mierzonych zakłóceń (rys. 6b).

#### 4. Zakończenie

- Lokalne źródła wyładowań o charakterze snopienia w liniach napowietrznych tworzą się w miejscach, które ze względu na rozkład i wartości natężenia pola elektrycznego utożsamiane są z defektami w linii i osprzęcie.
- Obrazy fazowe rejestrowanych zbiorów impulsów zakłóceń generowanych przez takie źródła przyjmują postać właściwą dla danego typu defektu.
- W badaniach laboratoryjnych można zastosować modelowanie uszkodzeń rzeczywistych z rejestracją obrazów fazowych dla ich identyfikacji w praktyce. Oznacza to możliwość zastosowania metody obrazów fazowo-rozdzielczych w diagnostyce linii przesyłowych wysokich napięć i ich korelację z defektami w liniach.
- Rejestracja obrazów fazowo-rozdzielczych jest metodą komplementarną do innych metod proponowanych, w tym do badań termowizyjnych, pozwalających na lokalizację uszkodzeń przejawiających się zwiększoną rezystancją, a więc lokalnie podwyższoną temperaturą.

#### Literatura

- [1] **Loftness M. O.:** *Power Line RF Interference — Sound, Patterns and Myths*, IEEE Trans. PD-12, Vol. 12, No. 2, 1997, pp. 934–940
- [2] **Engel Z., Wszolek T.:** *Wpływ ulotu na hałas emitowany przez linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia, Jakość i użytkowanie energii elektrycznej*, T. II, Zeszyt 2, 1996, s. 35–41

- [3] **Jaensch G., Hoffmann H.:** *Corona mesurment for detection of defect location of transmission lines*", *Konf. Nauk.-Tech. "Wykorzystanie usług lotniczych w eksploatacji sieci elektroenergetycznych*, Świerklaniec, str. 69–83, 1999
- [4] CISPR16 — *CISPR Specifications for Radio Interference Measuring Apparatus and Measurement Methods* (edited by IEC, International Special Committee on Radio Interference), Publication 16, 1987
- [5] Polska Norma PN-93/T-06450: *Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Urządzenia i metody pomiarów zakłóceń radioelektrycznych*
- [6] **M. Florkowski:** *Partial discharge image recognition using neural network for high voltage insulation systems*, Wyd. AGH, Rozprawy i Monografie nr 45, Kraków, 1996
- [7] **Awad M. M., Swidan M., Said H. M., Moustafa F. A., Radwan R. M.:** *The egyptian experience for electric & magnetic fields and radio noise with compact and traditional towers*, CIGRE, 1998, 22/33/36-09
- [8] **Kim J. B., Lee D., Shin K. Y., Ahn H. S., Yang K. H.:** *Electromagnetic interference from a three phase double circuit 765 kV test line*, IEEE Trans. PD-14, Vol. 14, No. 1, 1999, pp. 266–271

## CORONA EFFECT ANALYSIS BASED ON PHASED RESOLVED IMAGES

In the paper the detection of corona effect based on phased resolved images was considered. The electromagnetic interference (EMI) from power transmission lines and substations apparatus is caused either by corona or gap sparkover. Corona is an electrical partial discharge initiated by a strong inhomogeneous field strength associated with high voltage (HV) forming ionized air zone, occurring e.g. in high voltage insulators subjected to many environmental stresses like air temperature, humidity, rain, rime, icicle, sun radiation and pollution. Moreover corona produces ozone that destroys power line hardware, glows and generates broad spectrum electromagnetic noise (RF/UHF) as well as audible low frequency noise. Results of measurements indicates that phase-resolved images of corona interferences are well correlated with kind of defects.

Badania przedstawione w niniejszym referacie zrealizowano w ramach umów nr: 10.10.120.138/p, 10.10.120.510/p oraz grantu 18.18.120.151 finansowanych przez Komitet Badań Naukowych