

## ZASTOSOWANIE ANALIZATORA WIDMA W BADANIACH DIAGNOSTYCZNYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA BAZUJĄCYCH NA DETEKCJI ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Paweł ZYDRON, Józef ROEHRICH, Michał BONK, Łukasz FUŚNIK

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

tel.: 12 6172835 e-mail: pzydron@agh.edu.pl, roehrich@agh.edu.pl, bonkm@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia detekcji i analizy zaburzeń elektromagnetycznych ( $E-M$ ) wytwarzanych przez defekty urządzeń elektroenergetycznych charakteryzujące się występowaniem silnych pól elektrycznych. Dla tego typu defektów zlokalizowanych w powietrzu skutkiem może być m.in. powstawanie ulotu elektrycznego oraz wyładowań iskrowych. Zaburzenia przez nie emitowane są badane ze względu na wymagania określone przez regulacje prawne, dotyczące dopuszczalnych poziomów emisji promieniowania  $E-M$  oraz dla potrzeb diagnozowania stanu technicznego urządzeń, np. linii przesyłowych.

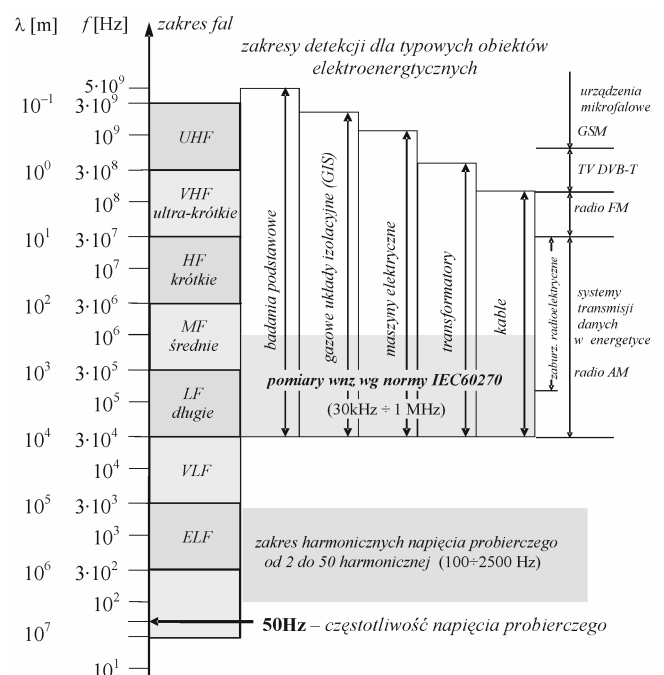
W badaniach opisanych w artykule zastosowano szerokopasmowy analizator widma oraz komputerowo sterowany system rejestracji wyładowań niezupełnych. Konfiguracja pomiarowa umożliwia wykonanie analizy fazowo-rozdzielczej selektywnie częstotliwościowo wykrywanych impulsów zaburzeń  $E-M$ , rejestrowanych synchronicznie względem napięcia probierczego, powodującego powstawanie wyładowań.

**Słowa kluczowe:** elektroenergetyka, wysokie napięcie, wyładowania elektryczne, wyładowania ulotowe, EMC, diagnostyka.

### 1. WPROWADZENIE

Celem badań diagnostycznych w elektroenergetyce jest ocena aktualnego stanu technicznego eksploatowanych urządzeń (diagnoza) oraz na tej podstawie przewidywanie i planowanie dalszych możliwości i scenariuszy ich użytkowania (prognoza), z zapewnieniem odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa i niezawodności pracy [1].

Defekty występujące w urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia mogą skutkować ujawnieniem się miejsc (elementów), w których natężenie pola elektrycznego przekracza wartość krytyczną. Oznacza to, że możliwe jest wówczas lokalne pojawienie się wyładowań elektrycznych, które mogą przybierać różne formy: wyładowań ulotowych, iskrowych, powierzchniowych, wewnętrznych (np. w inkluzjach gazowych, zlokalizowanych w izolacji stałej) i innych. Każde z wyładowań powoduje przepływ krótkotrwałego prądu impulsowego, którego kształt, ładunek, energia oraz parametry czasowe i częstotliwościowe mogą zawierać się w bardzo szerokim przedziale wartości [2-5]. W swoim otoczeniu stają się one źródłem zaburzeń przewodzonych oraz promieniowanych. W tym drugim przypadku, powstające zaburzenia elektromagnetyczne mogą być w praktyce rejestrowane w bardzo szerokim zakresie częstotliwości (rys. 1), od pasma fal długich (30-300 kHz) aż do pasma UHF (0,3-3,0 GHz).



Rys. 1. Podział widma  $E-M$  na pasma oraz zakresy ich zastosowań w badaniach diagnostycznych wybranych grup urządzeń elektroenergetycznych (na podstawie [3])

Obecność zaburzeń przewodzonych i promieniowanych, wywołanych wyładowaniami elektrycznymi, jest wykrywana i badana, przy zastosowaniu odpowiednich metod pomiarowych [2, 6-10], z dwóch podstawowych powodów:

- 1) istnienia regulacji prawnych i szczegółowych wymagań technicznych dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) i konieczności kontroli poziomów emisyjności instalacji i urządzeń elektroenergetycznych, ze względu na dopuszczalne poziomy zaburzeń elektromagnetycznych emitowanych do otoczenia;
- 2) możliwości zastosowania wyników rejestracji zaburzeń elektromagnetycznych dla potrzeb związanych z diagnozowaniem instalacji i urządzeń elektroenergetycznych, np. linii napowietrznych, transformatorów, rozdzielnic osłoniętych typu GIS (Gas Insulated Substations).

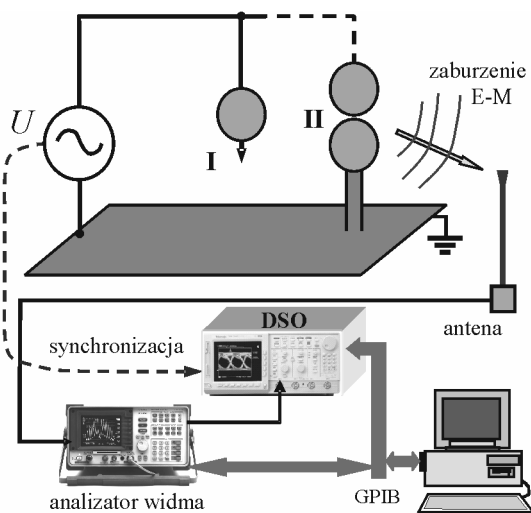
Tego rodzaju badania są prowadzone już od kilkadziesiąt lat, a ciągła aktualność tej tematyki jest związana przede wszystkim z [10-23]:

- rozwojem układów przesyłowych najwyższych napięć, zarówno napięcia przemiennego AC, jak i stałego DC;
- stałym postępem w dziedzinie konstrukcji aparatury pomiarowej oraz opracowaniem nowych metod analizy danych, bazujących na teorii sygnałów oraz współczesnych technikach ich przetwarzania cyfrowego DSP (*Digital Signal Processing*);
- wprowadzaniem metod detekcji i analizy sygnałów szerokopasmowych VHF/UHF do diagnostyki *on-line* układów izolacyjnych wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych. Dotyczy to w szczególności diagnostyki rozdzielnic GIS, generatorów mocy oraz transformatorów energetycznych.

Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia detekcji i pomiaru zaburzeń *E-M* wytwarzanych przez defekty urządzeń wysokonapięciowych skutkujące powstawaniem ulotu elektrycznego oraz wyładowań iskrowych, z punktu widzenia potrzeb diagnostycznych. W badaniach zastosowano szerokopasmowy analizator widma z anteną prętową oraz komputerową rejestrację fazowo-rozdzielczą wyładowań, z zastosowaniem oscyloskopu cyfrowego o dużej częstotliwości próbkowania.

## 2. DETEKCJA ZABURZEŃ *E-M* – OPIS METODY, APARATURY I WYNIKÓW EKSPERYMENTU

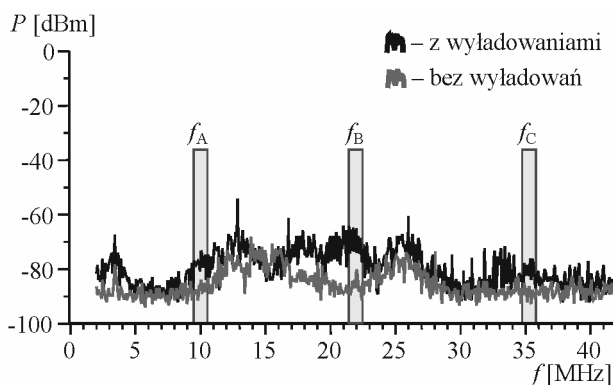
Podczas badań laboratoryjnych dla detekcji antenowej zaburzeń promieniowanych pochodzących od wyładowań elektrycznych generowanych w źródłach modelowych zastosowano stanowisko pomiarowe o konfiguracji przedstawionej na rysunku 2. Część wysokonapięciowa stanowiska była zlokalizowana w polu probierczym zasilanym ze źródła napięcia przemiennego (kaskada transformatorowa 250 kV). Wyładowania ulotowe wytwarzano na elektrodzie ostrzowej znajdującej się w odległości ok. 0,8 m od płaszczyzny uziemionej. Dla generacji wyładowań iskrowych zastosowano iskiernik kulowy DIS 250 (dwie kule miedziane o średnicach 250 mm), ustalając odstęp pomiędzy kulami iskiernika na ok. 2 mm. Źródło wysokiego napięcia oraz elementy dołączane do potencjału zerowego były połączone z uziemieniem własnym laboratorium.



Rys.2. Schemat blokowy stanowiska do rejestracji zaburzeń *E-M* od wyładowań powstających w układach modelowych do generacji wyładowań: I – ulotowych, II – iskrowych w szczeliny gazowej

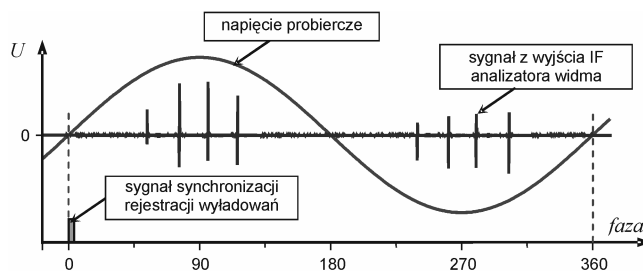
Podczas badań wytwarzano wyładowania ulotowe bądź iskrowe, wykrywane za pomocą 2-metrowej anteny prętowej umieszczonej na wyższej kondygnacji laboratorium niż pole probiercze, w odległości ok. 9-10 metrów od źródła zaburzeń. Sygnał z anteny był podawany na wejście analizatora widma, model HP8591E, zasilanego poprzez filtr przeciwzakłóceńowy. Urządzenie to, wyposażone w wielostopniowe układy przemiany częstotliwości, pozwala na wykonywanie analiz sygnałów w zakresie od 9 kHz do 1,8 GHz.

Rysunek 3 przedstawia przykładowe widmo sygnału w zakresie częstotliwości od 2 MHz do 42 MHz, zarejestrowane dla układu modelowego wyładowań ulotowych, przy dużej intensywności tych wyładowań i przy ich braku. Widoczny jest wyraźny wzrost poziomu widma sygnału w przypadku występowania wyładowań ulotowych. Dla potrzeb analizy diagnostycznej sygnałów *E-M* należy tak dobrać pasmo detekcji, aby uzyskać dużą wartość współczynnika sygnał/szum. Dla przedstawionego przykładu wybrano trzy zakresy częstotliwości z częstotliwościami środkowymi  $f_0$  oznaczonymi jako:  $f_A, f_B$  i  $f_C$ .



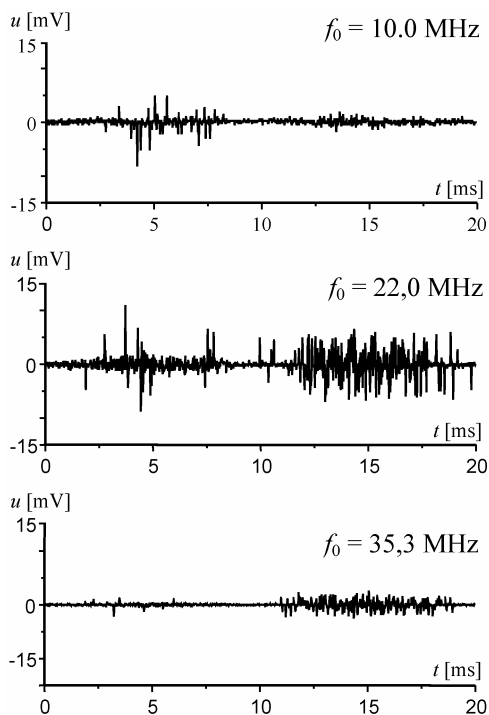
Rys. 3. Przykładowe widmo sygnału, dla układu modelowego wyładowań ulotowych, w obecności wyładowań i przy ich braku

Zastosowany analizator widma jest wyposażony w dodatkowe wyjście częstotliwości pośredniej *IF* (*Intermediate Frequency*). Dzięki temu, przy ustawieniu analizatora w tryb pracy *Zero Span* (bez skanowania widma) można dokonać analizy zmienności poziomu sygnału dla jednego, wąskiego pasma częstotliwości, rejestrując go za pomocą oscyloskopu cyfrowego *DSO* (*Digital Storage Oscilloscope*), w opisanych badaniach stosowano oscyloskop Tektronix TDS784D. W badaniach wyładowań elektrycznych, powstających pod wpływem napięcia przemiennego cenną informacją jest znajomość fazy napięcia, przy której one się pojawiają. Analiza wyładowań z jej uwzględnieniem (rys. 4) jest określana mianem analizy fazowo-rozdzielczej [2].



Rys. 4. Synchronizacja rejestracji sygnału z wyjścia *IF* analizatora

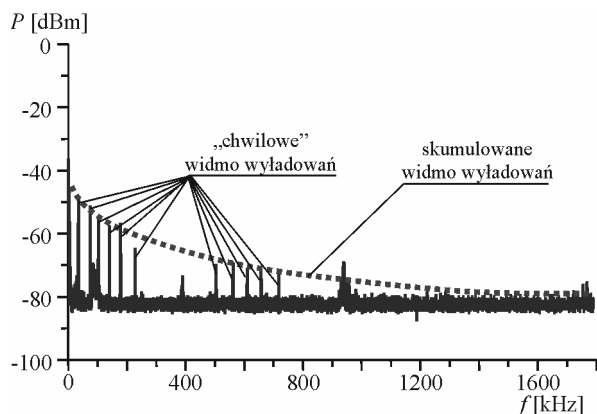
Przebiegi czasowe wybranych sygnałów pasmowych dla ulotu elektrycznego, rejestrowane przy synchronizacji układu wyzwalań oscyloskopu cyfrowego napięciem przemiennym 50 Hz, uzyskanym z dzielnika wysokiego napięcia Phenix KVM 200, przedstawia rysunek 5.



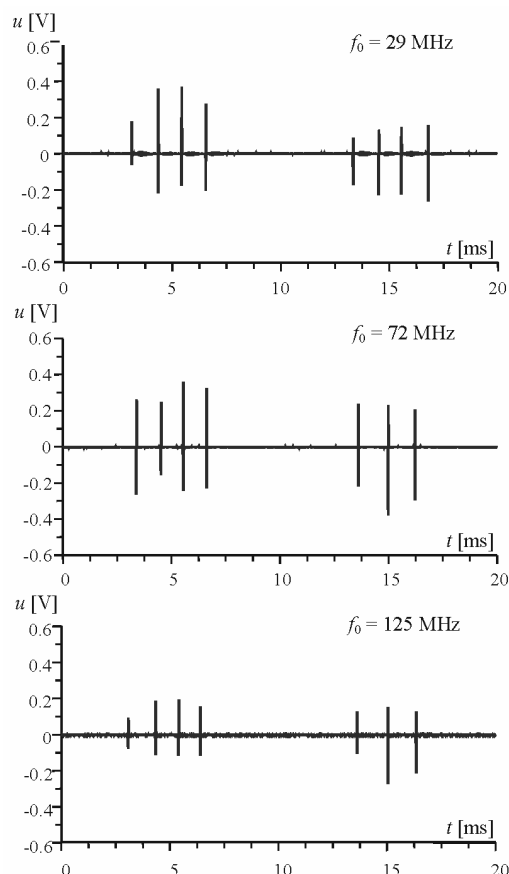
Rys. 5. Przykładowe przebiegi czasowe sygnału z wyjścia pośredniej częstotliwości *IF* analizatora widma HP8591E, synchronizowane z napięciem przemiennym 50 Hz zasilającym układ modelowy służący generacji wyładowań ulotowych

Tak, jak dla wyładowań ulotowych wykonano również rejestrację widm sygnału oraz przebiegów czasowych sygnału pośredniej częstotliwości *IF* dla wyładowań generowanych przez źródło wyładowań iskrowych (rys. 6 i 7).

Przy analizie w pełnym zakresie częstotliwościowym analizatora pojawia się problem związany z przypadkowością występowania pojedynczych impulsów wyładowań w trakcie sekwencyjnego skanowania widma. Sprawia to, że linie widma związane z sygnałami wyładowań są nałożone na widmo lokalnego tła elektromagnetycznego (rys. 6). Ponieważ impulsy wyładowań są krótkotrwałe i występują stochastycznie, dla określenia ich właściwości widmowych należy więc w tej metodzie wykonać odpowiednio dużą liczbę rejestracji, aby określić widmo skumulowane. Dzięki większej energii wyładowań iskrowych, w stosunku do wyładowań ulotowych, możliwe jest ich wykrywanie w dużo szerszym zakresie częstotliwości. Potwierdzają to przebiegi czasowe sygnałów pośredniej częstotliwości *IF*, rejestrowane synchronicznie względem napięcia probierczego, przedstawione na rysunku 7.



Rys. 6. Przykładowe szerokopasmowe widmo sygnału dla układu modelowego wyładowań iskrowych, w obecności wyładowań



Rys. 7. Przykładowe przebiegi czasowe sygnału z wyjścia pośredniej częstotliwości *IF* analizatora widma, synchronizowane z napięciem przemiennym 50 Hz, zasilającym układ modelowy generacji wyładowań iskrowych

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Impulsowe sygnały elektromagnetyczne wytwarzane przez różne formy wyładowań elektrycznych stanowią potencjalne źródło zaburzeń, pogarszających warunki pracy znajdujących się w pobliżu urządzeń elektronicznych. Ponieważ zaburzenia o takim charakterze powodują zmianę amplitudy sygnału w obwodach antenowych, w związku z tym są one szczególnie uciążliwe dla urządzeń odbiorczych pracujących z modulacją amplitudową *AM*.

Ważną aplikacją detekcji zaburzeń *E-M* jest możliwość ich zastosowania w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych. Konfiguracja pomiarowa opisana w artykule umożliwia wykonanie analizy fazowo-rozdzielczej selektywnie (pod względem częstotliwościowym) wykrywanych impulsów zaburzeń *E-M*. Są one rejestrowane synchronicznie względem napięcia probierczego, wywołującego powstawanie wyładowań elektrycznych. Wykonane pomiary wskazują na znacznie szerszy zakres częstotliwości detekcji wyładowań iskrowych, przede wszystkim z powodu większej ich energii, w stosunku do wyładowań ulotowych.

Podczas badań diagnostycznych przy zastosowaniu metod antenowych w zakresach *VHF/UHF* należy mieć na uwadze właściwości widmowe poszczególnych form wyładowań. Przykładowo, dla wyładowań ulotowych analiza przebiegów czasowych (rys. 5) wskazuje, że dobór częstotliwości pomiarowej wpływa na możliwości detekcji i wykrycie wyładowań o dodatniej i ujemnej biegunowości.

Dalsze prace prowadzone w tym zakresie obejmują opracowanie strojonych, pasmowo-selektywnych układów pomiarowych z antenami kierunkowymi, umożliwiającymi lokalizację przestrzenną źródeł wyładowań.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Florkowska B., Moskwa Sz, Nowak W., Włodek R., Zydrón P.: Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2006
2. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R, Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001
3. Zydrón P.: Wybrane zagadnienia analizy czasowej i częstotliwościowej wyładowań niepełnych, Zakład Elektroenergetyki, AGH, Kraków 2001
4. CIGRÉ Working Group 36.01: Interferences produced by corona effect of electric systems. Description of phenomena. Practical guide for calculation, CIGRÉ Brochure no. 20, Paryż, 1974
5. CIGRÉ Working Group 36.01, Addendum to CIGRE document no 20 (1974): Interferences produced by corona effect of electric systems, CIGRÉ Brochure no. 61, Paryż, 1999
6. CIGRE/CIREC Joint Working Group C4.202: Guide for measurement of radio frequency interference from HV and MV substations, CIGRÉ Brochure no. 391, Paris, 2009
7. CISPR 16-1-1:2015 – Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus
8. CISPR TR 18-1:2010 – Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment - Part 1: Description of phenomena
9. CISPR TR 18-2:2010 – Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment - Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits
10. IEC 60270:2000 + IEC 60270/A1/ed.3: 2015 – High-voltage test techniques - Partial discharge measurements
11. Vaillancourt G. H., Dechamplain A., Malewski R.: Simultaneous measurement of partial discharge and Radio-Interference Voltage, IEEE Trans. Instrum. and Meas., vol. 31, no. 1, 1982, s. 49-52.
12. Vaillancourt G.H., Malewski R., Train D.: Comparison of three techniques of partial discharge measurements in power transformers, IEEE Trans. Power Appar. and Systems, vol. 104, no. 4, 1985, s. 900-909
13. Sellars A.G., Farish O., Peterson M.M.: UHF detection of leader discharges in SF<sub>6</sub>, IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul., vol. 2, no. 1, 1995, s. 143-154
14. Reid A.J., Judd M. D., Fouracre R.A., Stewart B.G., Hepburn D.M.: Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques, IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul., vol. 18, no. 2, 1995, s. 444-455
15. Olsen R.G., Schennum S.D.: A method for calculating wide band electromagnetic interference from power line corona, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10. no. 3, 1995, s. 1535-1540
16. Loftness M. O.: Power line RF interference – sounds, patterns and myths, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 2, 1997, s. 934 -940.
17. Hikita M. et al.: Electromagnetic noise spectrum caused by partial discharge in air at high voltage substations, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 2, 1998, s. 434-439
18. van Bolhuis I., Gulski E., Smit J., Grun T., Turner M.: Comparison of conventional and VHF partial discharge detection methods for power transformers, Conf. Proc. ISH, London, 1999, paper 5.49.S10
19. Florkowska B., Zydrón P., Florkowski M.: Localization and identification of corona forms based on phase-resolved images, Measurement Science and Technology, vol. 12, 2001, s. 1304-1310.
20. Aschenbrenner D., Kranz H-G., Rutgers W.R., van den Aardweg P.: On line PD measurements and diagnosis on power transformers, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. vol. 12, no. 2, 2005, s. 216-222
21. Cavallini, A., Montanari G.C., Tozzi M., Chen Xiaolin: Diagnostic of HVDC systems using partial discharges, IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul., vol. 18, no. 1, 2011, s. 275-284.
22. Leonida T., Baran I., Costea M.: Remote diagnosis of insulator strings using radiated emission, 2015 IEEE PowerTech, Eindhoven, 2015, s 1-6.
23. Wang-ling He i in.: Influence of altitude on radio interference level of AC power lines based on corona cage, IET Science, Measurement & Technology, vol. 9, no. 7, 2015, s. 861-865

### APPLICATION OF A SPECTRUM ANALYZER IN DIAGNOSTIC TESTING OF HIGH VOLTAGE INSULATION SYSTEMS BASED ON THE DETECTION OF ELECTROMAGNETIC DISTURBANCES

The paper presents selected issues of detection and analysis of electromagnetic (*E-M*) disturbances produced by defects in electric power devices, characterized by the presence of strong electric fields. This type of defects localized in the air can result in the formation of the corona or spark discharges. Disturbances that they emit are investigated due to the requirements specified by the legal regulations on maximum levels of *E-M* radiation emission and for diagnosing the state of the electric power equipment, for example transmission lines.

In the study described in this paper wideband spectrum analyzer and computer controlled partial discharges registration system, based on digital storage oscilloscope, have been used. Measurement configuration allows to perform the phase-resolved analysis of pulses detected in selected band of *E-M* spectrum, recorded synchronously with the testing *AC* voltage, causing the discharges.

**Keywords:** electrical power, high voltage, electric discharge, corona discharge, EMC, diagnostics.