

Cyprian SZYMCZAK\*  
Filip POLAK\*  
Wojciech SIKORSKI\*  
Krzysztof SIODŁA\*

## **STANOWISKO DO BADAŃ REFERENCYJNYCH W ZAKRESIE DETEKcji, IDENTYFIKACJI I LOKALIZACJI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH**

Artykuł podejmuje aktualną tematykę detekcji, lokalizacji i identyfikacji wylądowań niezupełnych (wnz) w urządzeniach elektroenergetycznych z użyciem metod wykorzystujących sygnały elektromagnetyczne w zakresie UHF (ang. Ultra High Frequency – ultra wysokie częstotliwości). Przedstawiony został proces projektowania i budowy stanowiska badawczego, umożliwiającego przeprowadzanie badań z wykorzystaniem metod detekcji, identyfikacji i lokalizacji wylądowań niezupełnych. Głównym elementem jest symulator wnz w postaci przenośnego generatora iskry elektrycznej, wykorzystywanego dalej jako referencyjne źródło sygnału elektromagnetycznego. W pracy oprócz opisu stanowiska badawczego oraz procesu jego projektowania i budowy zostały przedstawione wyniki badań rejestracji sygnału fali elektromagnetycznej generowanej przez źródło referencyjne.

SŁOWA KLUCZOWE: wylądowania niezupełne, diagnostyka transformatorów, anteny VHF/UHF

### **1. WPROWADZENIE**

Przewidywany czas pracy transformatora energetycznego wynosi 30 lat i jest zakładany podczas jego projektowania. Przeważająca liczba transformatorów energetycznych znajdujących się w polskim systemie elektroenergetycznym przekroczyła czas zakładanej początkowej eksploatacji. Starzenie izolacji papierowo-olejowej zastosowanej w transformatorach energetycznych przyczynia się do powstawania zjawiska wylądowań niezupełnych (wnz). Dzięki diagnostyce transformatorów różnymi metodami badań (m. in. oceny zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej, analizy gazów rozpuszczonych w oleju, pomiarów termowizyjnych, spektrofotometrii) możliwa jest dalsza eksploatacja jednostek.

---

\* Politechnika Poznańska.

Problematyka dotycząca detekcji, identyfikacji i lokalizacji wnz jest obecnie przedmiotem szeroko prowadzonych prac badawczych na całym świecie. Ich celem jest m.in. rozwój aktualnie stosowanych technik diagnostyki i monitoringu transformatorów energetycznych opartych na detekcji zjawiska wnz [5–9].

Zarówno w badaniach nad nowymi metodami lokalizacji i detekcji, jak i podczas prób udoskonalania istniejących rozwiązań, niezwykle pożądanym jest, aby sygnały docierające od źródeł wyładowań niezupełnych były możliwie jak najbardziej powtarzalne. Bardzo często zdarza się, że każdorazowo należy stworzyć nowy układ wyładowczy, ze względu na fakt, iż modele są zazwyczaj tymczasowe – długotrwałe poddawanie próbek działaniu wyładowań niezupełnych doprowadza ostatecznie do ich uszkodzenia. Genezą tematu jest więc potrzeba generowania powtarzalnych sygnałów pochodzących od wyładowań z jednoczesnym zachowaniem długiej żywotności układu [4, 6–9].

Wyładowanie niezupełne, ze swojej definicji, to wyładowanie, które nie zwiera elektrod. Jest lokalnym zjawiskiem, występującym w miejscach o silnie niejednorodnym polu elektrycznym. Układ izolacyjny poddany długotrwałemu oddziaływaniu na niego wnz ulega stopniowej degradacji, co w rezultacie może być przyczyną ewentualnego przebicia izolacji, a w efekcie poważnej awarii transformatora.

Do detekcji wyładowań niezupełnych wykorzystuje się metody opierające się na różnych zjawiskach towarzyszących występowaniu wnz. Należą do nich przede wszystkim: emisja sygnałów akustycznych (metoda AE), sygnałów elektromagnetycznych (metody HF, VHF, UHF), lokalny wzrost temperatury i wydzielanie się gazów, w większości palnych (metoda DGA).

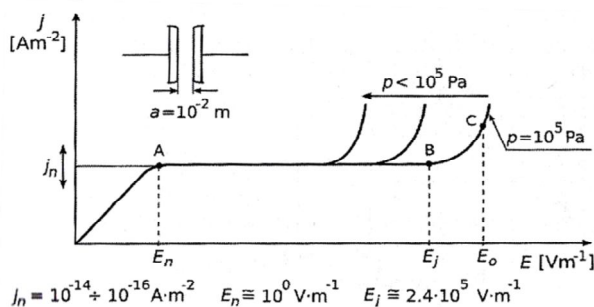
W kolejnych punktach zaprezentowano poszczególne etapy prac nad układem wyładowczym oraz wyniki próby lokalizacji wyładowań przy pomocy autorskiego układu pomiarowego, w postaci matrycy anten UHF.

## 2. WYŁADOWANIA ELEKTRYCZNE W GAZACH

Ładunki swobodne znajdujące się pod wpływem pola elektrycznego poruszają się wzdłuż linii sił pola. Swobodne ładunki elektryczne powstają na drodze jonizacji przestrzennej gazu, jonizacji powierzchniowej elektrody pod napięciem lub jonizacji powierzchniowej dielektryka stałego bądź ciekłego. Uporządkowany ruch ładunków skutkuje przepływem prądu, czyli wyładowaniem elektrycznym. Rozróżnia się dwie wartości natężenia pola elektrycznego podczas przepływu prądu w gazie:  $E_j$  – natężenie początkowe jonizacji zderzeniowej oraz  $E_0$  – natężenie krytyczne przy którym zaczynają występować wyładowania samoistne [2].

Zderzenia jonizujące są inicjatorem wyładowania lawinowego. Kolejne zderzenia nieelastyczne prowadzą do następnych zderzeń, czyli jonizacji kolejnych

cząstek, a co za tym idzie do wykładniczego wzrostu ładunków i natężenia prądu w układzie. W tym etapie wyładowanie lawinowe jest wyładowaniem niesamodzielnym, gdyż podtrzymywane jest wyłącznie przez oddziaływanie zewnętrznych jonizatorów [3].



Rys. 1. Charakterystyka prądowo–napięciowa dla powietrza w jednorodnym polu elektrycznym pomiędzy elektrodami płaskimi w odległości  $a$ , gdzie:  $j_n$  – gęstość prądu nasycenia,  $E_n$  – natężenie pola elektrycznego odpowiadające prądowi nasycenia,  $E_j$  – natężenie jonizacji zderzeniowej przy ciśnieniu 105 kPa,  $E_0$  – natężenie krytyczne [2]

Rozwój wyładowań lawinowych zależy w głównej mierze od trzech czynników: odległości elektrod  $a$ , ciśnienia gazu  $p$  oraz współczynnika niejednorodności pola. Podstawowymi mechanizmami rozwoju wyładowań są: mechanizm Townsenda (małe wartości iloczynu  $ap$ ), mechanizm kanałowy, dzielący się na strimerowy (średnie wartości iloczynu  $ap$ ) i strimerowo-liderowy (duże wartości iloczynu  $ap$ ) [2, 3].

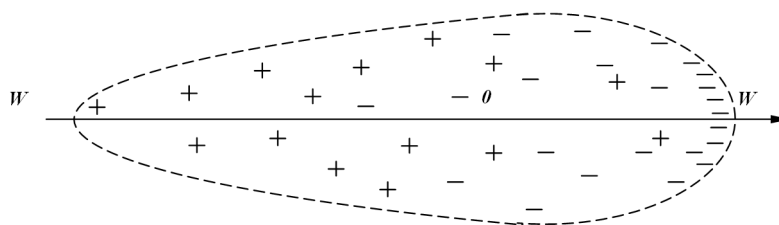
Powstawanie lawiny elektronowej jest charakterystycznym elementem wspólnym dla powyższych mechanizmów. Lawina zostaje zainicjowana w momencie przekroczenia przez elektron wartości energii jonizacyjnej  $eU_j$ , która na drodze  $\lambda_i$  w kierunku pola  $E$  wynosi  $eE\lambda_i$ . Określenie długości drogi swobodnej jest jednak zdarzeniem losowym, tak więc do szczegółowych rozważań podchodzi się z pewnym prawdopodobieństwem oraz przyjmuje się wartości średnie [3]. Współczynnik pierwotnej jonizacji zderzeniowej, czyli ilość zderzeń jonizacyjnych jednego elektronu na drodze jednego centymetra wyraża się wzorem [2]:

$$\alpha = C_1 p e^{(-C_2 p / E)} \quad (1)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie gazu (w hPa),  $E$  – natężenie pola elektrycznego (w V/cm),  $C_1$ ,  $C_2$  – stałe materiałowe.

Jony są atomami lub cząsteczkami połączonymi z dodatkowymi elektronami – jony ujemne lub pozbawionymi przynajmniej jednego elektronu – jony dodatnie. Masa najlżejszego atomu, wodoru (1,008 u), jest ponad 1800 razy większa od

masy elektronu ( $5,486 \cdot 10^{-4}$  u). Stąd też stosunek ładunku do masy dla jonów wypada niewielki. Pierwszy elektron, w wyniku zderzenia, jonizuje pierwszą obojętną cząsteczkę gazu. W następstwie tego będą dwa elektrony, które jonizują dwie kolejne cząsteczki gazu, w wyniku czego dalej będą już cztery elektrony, będące w stanie zjonizować cztery kolejne cząstki gazu, itd. Ruch ten nie odbywa się jednak w linii prostej, gdyż elektrony posiadają, jednocześnie z prędkością skierowaną wzdłuż linii sił pola elektrycznego, tzw. prędkość bezładną, co jest bezpośrednią przyczyną rozszerzania się lawiny elektronowej [1–3].



Rys. 2. Rozmieszczenie elektronów i jonów dodatnich w lawinie elektronowej

Paraboliczny kształt lawiny elektronowej wynika z zależności proporcjonalnego przyrostu promienia lawiny do pierwiastka z drogi. Czoło lawiny elektronowej jest chmurą elektronów, wyprzedzających ze znaczną prędkością jony dodatnie, poruszające się stosunkowo wolno w kierunku przeciwnym [1–3].

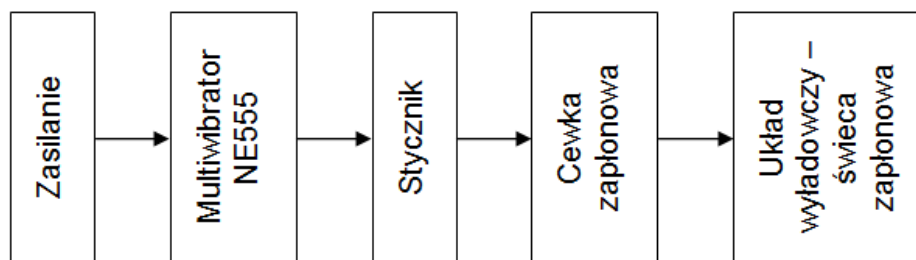
### 3. PROJEKT GENERATORA SYGNAŁÓW TESTOWYCH

Jak wspomniano wcześniej, impulsy elektromagnetyczne, towarzyszące występowaniu wnz, zawierają się w szerokim spektrum częstotliwości – od kilku MHz do ponad 1 GHz. Impuls, pochodzący od wnz, rejestrowany przy użyciu profesjonalnych sond UHF dedykowanych do kompletnych układów pomiarowych, np. firmy Qualitrol posiada podobną charakterystykę do impulsu wyemitowanego przez iskrę wygenerowaną przez samochodową świecę zapłonową. Iskra taka może posłużyć jako źródło powtarzalnych sygnałów podczas badań wykorzystujących metody detekcji i lokalizacji wylądowań niezupełnych [10].

Generator sygnałów testowych jest źródłem powtarzalnych sygnałów fali elektromagnetycznej, składa się z następujących elementów:

- bateryjnego źródła napięcia,
- multiwibratora NE555,
- stycznika jednofazowego sterowanego napięciem stałym,
- cewki zapłonowej,
- świecy zapłonowej.

Na rysunku 3 przedstawiony został schemat blokowy układu generacji sygnałów testowych.



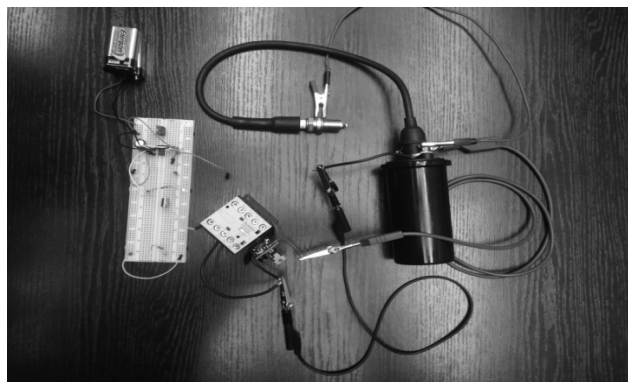
Rys. 3. Schemat blokowy układu generacji sygnałów testowych

Podanie zasilania na układ multiwibratora NE555 powoduje generację impulsów napięciowych. Okres generacji impulsów przez NE555 wynosi 1 sekundę. Impulsy napięciowe przekazywane są na cewkę stycznika powodując załączenie obwodów roboczych stycznika. Pojawia się napięcie na zaciskach cewki zapłonowej. Cewka zapłonowa składa się z dwóch uzwojeń nawiniętych na wspólny rdzeń. Uzwojenie pierwotne wykonane jest z drutu o przekroju dziesięciokrotnie większym niż uzwojenie wtórne. Natomiast uzwojenie wtórne posiada od 100–200 razy więcej zwojów niż uzwojenie pierwotne. Końce uzwojeń połączone są do bieguna ujemnego źródła zasilania. Drugi koniec uzwojenia wtórnego jest wyprowadzeniem wysokiego napięcia na świecę zapłonową. Na koniec uzwojenia pierwotnego podawane jest w sposób pulsacyjny niskie napięcie. Pulsacje niskiego napięcia na uzwojeniu pierwotnym umożliwią przepływ prądu przez to uzwojenie. Prąd przepływający przez uzwojenie pierwotne wywołuje przepływ strumienia magnetycznego w rdzeniu ferromagnetycznym cewki zapłonowej. Strumień magnetyczny indukuje przepływ prądu w uzwojeniu wtórnym. Duża liczba zwojów uzwojenia wtórnego powoduje podniesienie niskiego napięcia pierwotnego (12 V) do wysokiego napięcia wtórnego (ok. 1200 V). Tak wysokie napięcie wyprowadzone na świecę zapłonową powoduje przeskok iskry pomiędzy elektrodą wysokonapięciową a elektrodą uziemioną świecy zapłonowej. Przeskok iskry na świecy zapłonowej generuje sygnał elektromagnetyczny z zakresu ultra wysokich częstotliwości (UHF).

Podczas fazy testowej należało w odpowiedni sposób dostosować elementy rezystancyjne oraz pojemnościowe sterujące układem NE555. Nieprawidłowy dobór elementów mógłby spowodować zbyt częstą lub zbyt rzadką generację impulsów napięciowych sterujących stycznikiem.

Etapem końcowym budowy generatora impulsów było umieszczenie wszystkich elementów w szczelnej obudowie. Obudowa została dobrana w sposób optymalny, zapewniający odpowiednie rozmieszczenie elementów składo-

wych generatora (rys. 5). Urządzenie generujące sygnały wzorcowe zmieściło się w obudowie o wymiarach 190x140x70 mm.



Rys. 4. Układ generatora impulsów testowych podczas prototypowania (dobierania elementów składowych układu elektronicznego)



Rys. 5. Złożony generator impulsów testowych

#### **4. STANOWISKO BADAWCZE**

Jednym z najważniejszych kryteriów projektowych modułów odbiorczych układów pomiarowych do detekcji, identyfikacji i lokalizacji wnz, jest odpowiednie określenie częstotliwości odbieranego sygnału. Warunkuje to dobór specjalnych anten, których konstrukcja geometryczna musi być zoptymalizowana w taki sposób, aby jej pasmo przenoszenia obejmowało zakres częstotliwości dominujących sygnału generowanego przez wnz oraz aby nie wprowadzała silnych zaburzeń pola elektrycznego wewnątrz transformatora.



Rys. 6. Stanowisko badawcze detekcji, identyfikacji i lokalizacji wyładowań niepełnych

Układ generujący impulsy testowe został poddany serii pomiarów na specjalnie przygotowanym stanowisku. Modułem odbiorczym była pojedyncza antena unipolarna matrycy sensorowej Comet CH-99 – źródło sygnału (układ wyładowczy) oddalone było na odległość 1 metra od anteny. Pomiary przeprowadzone były w pomieszczeniu ekranowanym od zakłóceń i sygnałów zewnętrznych.

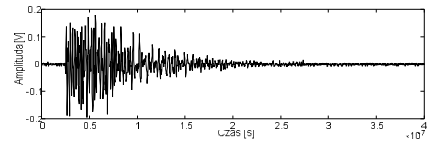
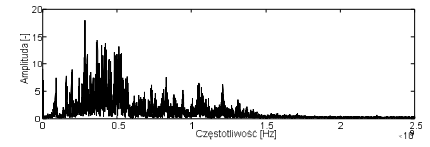
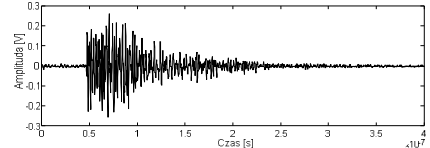
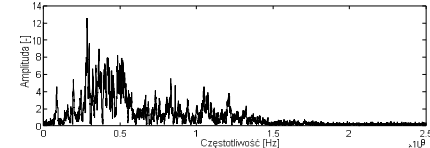
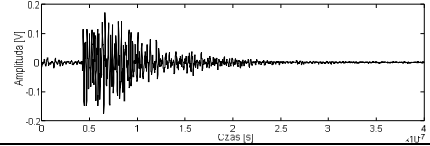
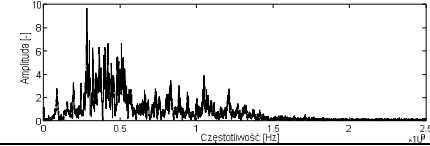
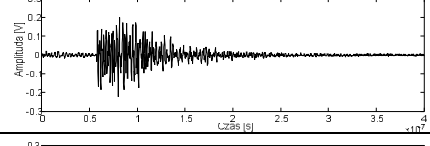
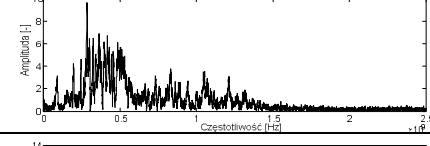
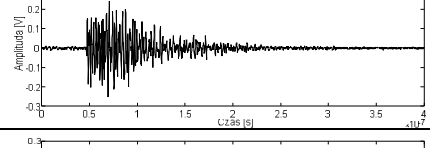
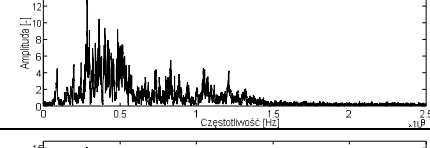
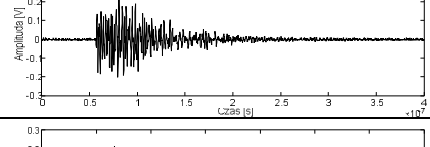
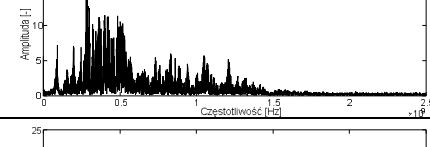
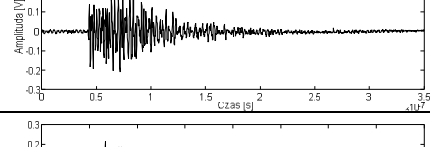
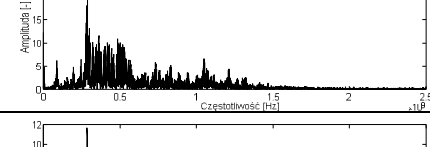
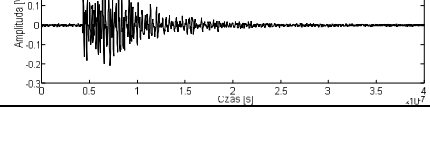
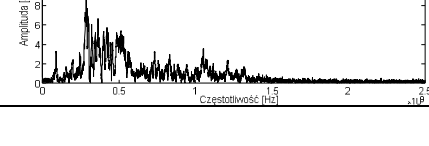
W celu poznania częstotliwości dominującej sygnału należy przeprowadzić jego analizę widmową. Istnieje wiele metod analizy widmowej, natomiast najczęściej stosuje się szybką transformatę Fouriera (ang. FFT – *Fast Fourier Transform*). Zarejestrowany sygnał poddawany był analizie zarówno w dziedzinie czasu jak i dziedzinie częstotliwości. Wyniki prezentuje tabela 1. Na potrzeby artykułu przedstawiono tylko 8 przykładowych przebiegów.

W tabeli 1 zaprezentowane zostały wyniki analizy częstotliwościowej sygnału zarejestrowanego przy pomocy anteny unipolarnej Comet CH-99. Widmo częstotliwościowe sygnału zawierało się w paśmie od 250 MHz do 650 MHz, z dominującymi częstotliwościami w przedziale od 350 MHz do 450 MHz. Czas propagacji impulsu wynosił ok. 0,2  $\mu$ s, średnia amplituda sygnału użytecznego oscylowała w granicach od 0,15 V do 0,2 V. Przedstawione charakterystyki widmowe pozwalają na stwierdzenie, iż wytwarzana w układzie wyładowczym iskra jest poprawnym źródłem impulsów elektromagnetycznych.

## 5. PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł prezentuje założenia teoretyczne oraz wyniki prac badawczych, dotyczących określenia możliwości zastosowania nieskomplikowanego układu wyładowczego, generującego iskrę w celu symulacji występowania wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych. Pozwala to na wykorzystanie sygnału pochodzącego od iskry wygenerowanej przez zaprojektowany układ wyładowczy do analizy różnych metod diagnostycznych. Wyniki można odnieść do wyładowań niepełnych, a co za tym idzie – wyznaczenia lokalizacji występowania defektu.

Tabela 1. Zestawienie przykładowych wyników analizy zarejestrowanych sygnałów

Lp.	Przebieg czasowy	Wynik analizy widmowej (FFT)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		



Wyciągnięcie powyższych wniosków nie byłoby możliwe bez wykorzystania zbudowanego stanowiska pomiarowego do analizy metod detekcji i lokalizacji wyładowań niepełnych. Koncepcja wykorzystania układu wyładowczego do generacji iskry wysokonapięciowej jako symulatora powtarzalnych impulsów elektromagnetycznych pochodzących od wnz jest zasadna i szeroko stosowana przez ekspertów z całego świata, o czym świadczą chociażby prace naukowe cenionego specjalisty w zakresie badań nad wyładowaniami niepełnymi – dra Martina D. Judda [10]. Koncepcja taka pozwala przede wszystkim na przeprowadzenie serii powtarzalnych pomiarów, co eliminuje występowanie błędów na poziomie samego sygnału, czyli podczas generacji wyładowań. Dzięki takiemu podejściu analizowane są wyłącznie techniki pomiarowe, co pozwala na dokładniejsze, niż dotychczas, analizowanie metod detekcji, identyfikacji i lokalizacji wyładowań niepełnych.

#### LITERATURA

- [1] Lidmanowski W., *Zarys teorii wyładowań w dielektrykach*, WNT, Warszawa 1988.
- [2] Witos F., *Badania wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
- [3] Flisowski Z., *Technika wysokich napięć*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2014.
- [4] Yan-Qing Li, Qing Xie, Nan Wang, Xin Xiang, Fang Cheng Lu, Simulation of PD Location in Power Transformer Based on Root Multiple Signal Classification Method, *Properties and Applications of Dielectric Materials*, (2009), 553–556.
- [5] Polak F., *Nowa metoda lokalizacji źródeł wyładowań niepełnych wykorzystująca technikę macryc sensorowych*, opracowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach projektu 04/41/DS-MK/4136.
- [6] Sikorski W., Ziomek W., Detection, Recognition and Location of Partial Discharge Sources Using Acoustic Emission Method (Chapter 3), *Acoustic Emission*, InTECH Publisher, (2012).
- [7] Sikorski W., Siodla K., Moranda H., Ziomek W., Location of Partial Discharge Sources in Power Transformers Based on Advanced Auscultatory Technique, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, Issue 6, (2012), 1948–1956.
- [8] Sikorski W., Ziomek W., *Detection, Recognition and Location of Partial Discharge Sources Using Acoustic Emission Method* (Chapter 3), *Acoustic Emission*, InTECH Publisher, (2012).
- [9] Markalous S., Tenbohlen S., Feser K., *Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, Issue 6, 2008, pp. 1576–1583.
- [10] Judd M.D., Pryor B.M., Kelly S.C., Hampton B.F., *Transformer monitoring using UHF technique*, IEE conference publication, 5.362. P5–5.365. P5.

**TEST SITE FOR REFERENCE TESTS IN THE SCOPE OF DETECTION,  
IDENTIFICATION AND LOCATION OF PARTIAL DISCHARGES**

This paper discuss the actual subject of detection, location and identification of partial discharge (PD) in electrical equipment using methods that use electromagnetic signals in the Ultra High Frequency (UHF) band. Design steps and construction process of research site to maintain tests using methods of detection, identification and location of PD were described. The main element is the PD simulator in the form of a portable electric spark generator, which is used as a reference source of electromagnetic signals. In further part of this paper analysis results of EM signal, generated with mentioned portable spark generator, both in time and frequency domain, were presented.

*(Received: 31. 01. 2017, revised: 15. 02. 2017)*