

DOI: 10.5604/20830157.1212272

ANALIZA MOŻLIWOŚCI DETEKCJI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W APARATURZE ROZDZIELCZEJ ŚREDNICH NAPIĘĆ W IZOLACJI POWIETRZNEJ METODĄ PRZEJŚCIOWEGO NAPIĘCIA DOZIEMNEGO

Rafał Buczko¹, Andrzej Sikora²¹ABB Centrum Rozwoju Produktów i Technologii Średniego Napięcia – Przasnysz,²Instytut Elektrotechniki Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego – Wrocław

Streszczenie. W nowoczesnej aparaturze rozdzielczej wykorzystuje się w coraz większym stopniu materiały polimerowe jako układy izolacyjne. Mimo swoich licznych zalet, wykazują one niekiedy ograniczoną wytrzymałość na wyładowania niezupełne. W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania nieinwazyjnej metody przejściowego napięcia doziemnego TEV do detekcji różnych form wyładowań niezupełnych w aparaturze rozdzielczej średnich napięć. Dzięki wykorzystaniu tej metody, diagnostyka odbywa się bez konieczności odstawiania urządzenia od systemu elektroenergetycznego. Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność metody.

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, aparatura rozdzielcza, przejściowe napięcie doziemne

ANALYSIS AND DETECTION POSSIBILITY OF THE PARTIAL DISCHARGES IN AIR INSULATED MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEAR USING TRANSIENT EARTH VOLTAGE DETECTION

Abstract. Modern switchgear increasingly use polymeric materials as insulation. Despite its numerous advantages they have limited resistance to partial discharge corrosion in some cases. In this paper noninvasive methods Transient Earth Voltage (TEV) measurement is proposed to detect various forms of partial discharges in medium voltage switchgear. These method allows for non-invasive diagnostic without switch of the switchgear. Measurement results confirm the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: partial discharges, switchgear, transient earth voltage

Wstęp

Wyładowania niezupełne są lokalnym przebiciami części izolacji pod wpływem przyłożonego napięcia. Wyładowania niezupełne zwierają jedynie część izolacji, całkowite zwarcie izolacji oznacza wyładowanie zupełne, będące często skutkiem długotrwałych wyładowań niezupełnych. Rozwijające się wyładowania przyspieszają mechanizmy degradacyjne takie jak starzenie jonizacyjne, cieplne i elektrochemiczne. Degradując, układy izolacyjne aparaty rozdzielczej mogą prowadzić do awarii zagrażających bezpieczeństwu personelu i ciągłości dostaw energii elektrycznej. Ze względu na charakter wyładowań, możemy je podzielić na: koronowe, powierzchniowe i wewnętrzne. W aparaturze rozdzielczej w izolacji powietrznej, główną przyczyną awarii są wyładowania powierzchniowe występujące na granicy faz dielektryk-powietrze. Podłoże rozwoju stanowi tutaj powierzchnia, która w zależności od wykorzystanego materiału i warunków klimatycznych, warunkuje powstawanie wyładowań. Procesowi degradacji układów izolacyjnych towarzyszą fale elektromagnetyczne, fale dźwiękowe i emisja gazów. Efekty te mogą z różną skutecznością zostać wykorzystane, do detekcji zjawiska.

Wykorzystanie detekcji fal elektromagnetycznych pozwala na bezinwazyjne kontrolowanie poziomu wyładowań niezupełnych. Brak ingerencji w układ umożliwia okresowe lub ciągłe monitorowanie poziomu wyładowań, zwiększając tym samym bezpieczeństwo i niezawodność.

1. Normalizacja w dziedzinie badań wyładowań niezupełnych w aparaturze rozdzielczej

Zgodnie z normą międzynarodową IEC 62271-103, aparaturę rozdzielczą średnich napięć nazywamy urządzeniami o napięciu znamionowym do 52 kV włącznie [7]. Obecny proces normalizacji IEC traktuje pomiar poziomu wyładowań niezupełnych, jako dobrowolny, a kwestie dopuszczalnego poziomu wyładowań pozostawia do ustalenia między wytwórcą urządzenia a jego odbiorcą. Podstawową normą pomiaru elektrycznych impulsów wyładowań metodą inwazyjną, jest norma IEC 60270 [9]. Dopuszczalna wartość ładunku pozornego została podana natomiast w normalizacji kanadyjskiej CSA C22.2 No. 193-M1983 i wymaga ona przeprowadzenia prób pomiaru poziomu wyładowań niezupełnych na urządzeniach o napięciu znamionowym 13,8 kV i wyższym gdzie dopuszczalny poziom wyładowań to 100 pC [5].

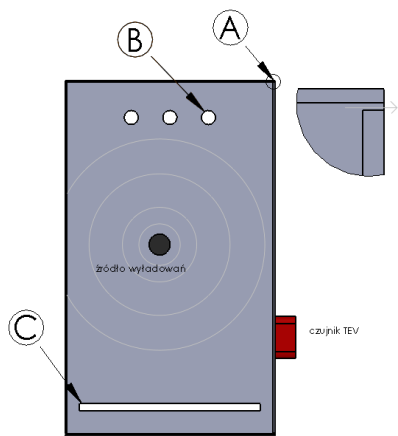
Dokumenty normalizacyjne wspominają również o możliwości wykonania nieinwazyjnych prób typu techniką analizy emisji akustycznej i emisji elektromagnetycznej [6]. Próbą ujęcia metod alternatywnych pomiaru poziomu wyładowań jest projekt normy IEC 62478 „High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods” [8].

2. Alternatywne metody pomiaru wyładowań niezupełnych

Jedną, jak dotąd znormalizowaną metodą pomiaru poziomu wyładowań niezupełnych, jest metoda elektryczna pomiaru ładunku pozornego [9]. Wymaga ona niestety wyłączenia urządzenia z eksploatacji, co może być związane z przerwami w dostawie energii i czasochłonnymi pomiarami. Alternatywne metody identyfikacji wyładowań niezupełnych wykorzystują do detekcji efekty towarzyszące wyładowaniom i mogą być używane bez konieczności odłączenia urządzenia. Metody nieinwazyjne wykorzystywane do detekcji wyładowań niezupełnych w aparaturze rozdzielczej to: metoda TEV, metoda emisji akustycznej i metoda detekcji elektromagnetycznej [2, 3, 4].

2.1. Wykorzystanie metody przejściowego napięcia doziemnego

Wyładowaniom niezupełnym towarzyszą fale elektromagnetyczne rozchodzące się w powietrzu, których intensywność jest uwarunkowana charakterem wyładowania i osłabieniem na drodze propagacji. Fala wnika w przewodnik, który w przypadku aparatury rozdzielczej jest metalową obudową, gdzie ulega silnemu tłumieniu. Głębokość wnikania zależy od rezystywności, przenikalności magnetycznej ośrodka i częstotliwości prądu (głębokość wnikania dla stali przy częstotliwości sygnału 100 Mhz wynosi około 0,5 μm). Pole elektryczne fali powoduje przepływ prądu powierzchniowego o dużej częstotliwości. Sygnał wysokiej częstotliwości generuje szybkie impulsy napięciowe nazywane TEV (Transient Earth Voltage). Typowy czas narastania sygnału to kilka nanosekund, a jego amplituda dochodzi do kilku woltów [1]. Z powodu efektu naskórkowego, sygnał nie jest w stanie przejść na wskroś przewodnika, wydostaje się natomiast biegnąc po powierzchni otworami technologicznymi oraz w miejscach łączenia materiałów (rysunek 1).



Rys. 1. Przykład wykorzystania metody TEV do pomiaru wyładowań niepełnych i miejsca wydostawania się sygnału na zewnętrzne okładziny metalowej obudowy

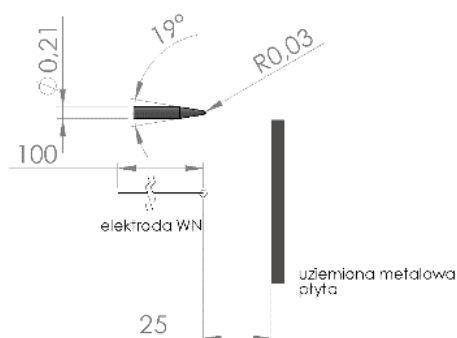
2.2. Pomiary przejściowego napięcia doziemnego

Badania zostały wykonane w metalowej obudowie wykonanej ze stali nierdzewnej o wymiarach 500×800×300 mm symulującej wewnętrzną rozdzielnicę. Widok obudowy przedstawiono na rysunku 2a Centralnie wewnątrz metalowej obudowy zostały umieszczone układy pozwalające uzyskać wyładowania niepełne typu korona, wyładowania powierzchniowe i wyładowania wewnętrzne, patrz rys. 2b-d. Obiekt zasilono z transformatora probierczego wysokiego napięcia z możliwością regulacji napięcia skutecznego w granicach 0–80 kV.

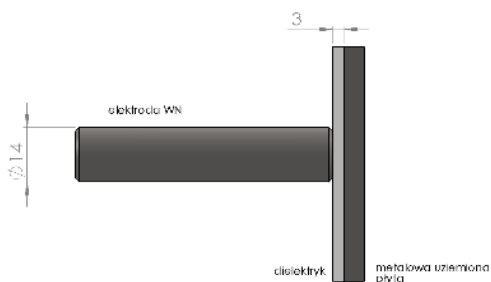
Sygnal został zmierzony przy użyciu czujnika pomiarowego TEV firmy HVPD, przymocowanego do obudowy za pomocą wbudowanych magnesów. Czulość urządzenia deklarowana przez producenta to 118,4 mV/V, pasmo przenoszenia 1 kHz–100 MHz. Do rejestracji sygnału wykorzystano oscyloskop PicoScope 3406B, częstotliwość próbkowania 1 Gs/s i pasmo przenoszenia do 200 MHz. Wartość napięcia probierczego została zmierzona bezpośrednio z badanego obiektu sondą probierczą Tektronix P6015A 1000V/1V.



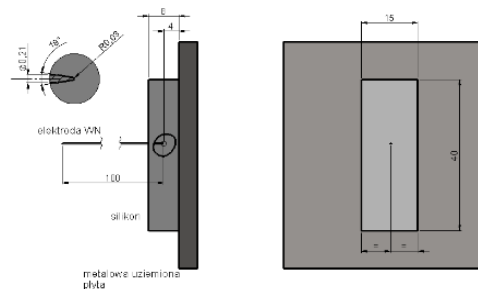
a) metalowa obudowa i czujnik TEV



b) układ generujący wyładowania typu korona



c) układ generujący wyładowania typu powierzchniowego



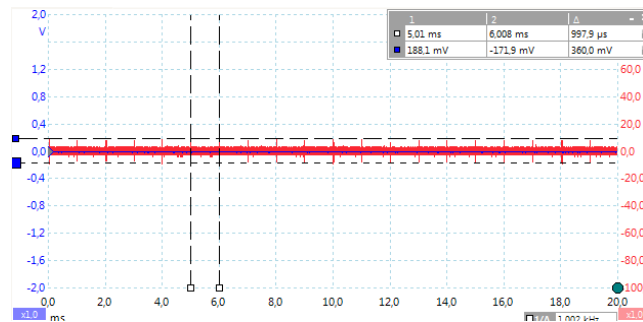
d) układ generujący wyładowania typu wewnętrznego

Rys. 2. Układy generujące wyładowania niepełne i metalowa obudowa wykorzystana do badań, wymiary podano w mm

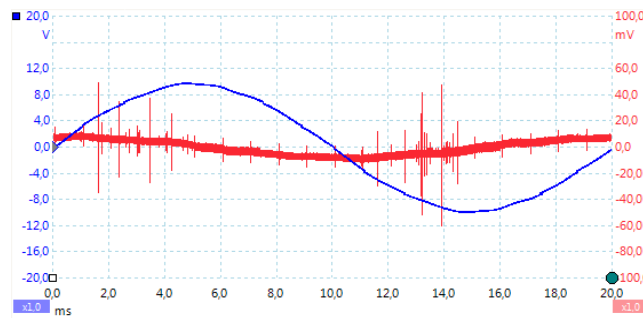
Przeprowadzone badania dotyczyły trzech rodzajów typów wyładowań.

• Wyładowania typu korona

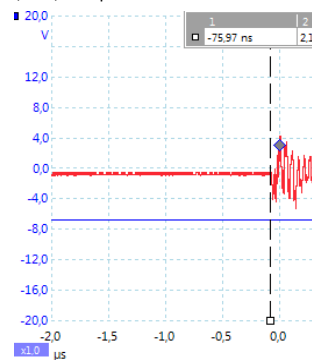
Wyładowania typu korona powstają, gdy zostaje przekroczone dopuszczalne natężenie pola elektrycznego dla danego dielektryka gazowego. Pomiary wykonano dla pełnego okresu sygnału sinusoidalnego 20 ms, aby zobrazować powiązanie między wartością napięcia zasilającego a impulsami TEV. Pierwszy pomiar wykonany został bez udziału napięcia probierczego. Analiza sygnału obrazuje sygnały zakłócenia i cykliczne impulsy, co około 1 ms o amplitudzie sygnału 10 mV, będące sygnałem zakłócenia



a) poziom zakłóceń



c) wartość skuteczna napięcia probierczego 6,8 kV, czas pomiaru 20 ms



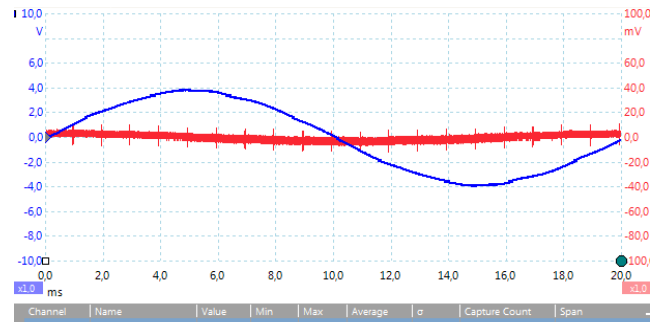
e) pojedynczy impuls napięciowy, czas pomiaru 5 μs

Rys. 3. Pomiary wyładowań typu korona

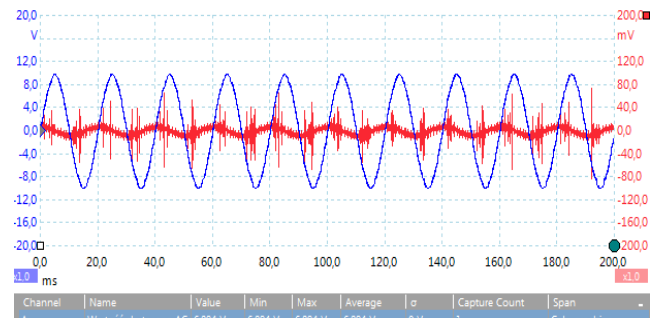
• Wyładowania typu powierzchniowego

Wyładowania typu powierzchniowego są niebezpieczną formą zmiany struktury warstwy powierzchniowej izolacji na skutek czynników zewnętrznych lub wewnętrznych. Nieodwracalne zmiany degradacyjne powodują zmniejszenie wytrzymałości dielektrycznej układu i w ostateczności mogą prowadzić do wyładowania zupełnego. Pomiary wykonano kolejno dla wartości skutecznej napięcia probierczego 3,9 kV, 5,7 kV i 6,8 kV. Analiza uzyskanych przebiegów świadczy o zwiększeniu się intensywności wyładowań pod wpływem podnoszenia napięcia probierczego. Amplituda i częstotliwość pojawiania się przejściowego napięcia doziemnego zwiększa się w miarę podnoszenia wartości napięcia, patrz rys 4a do 4c. Podobnie jak przy wyładowaniach typu korona, wyładowania rejestrowane są jedynie w narastającej części sinusoidy. Analiza sygnałów wykazuje również pojawienie się wyładowań w zerze napięcia, co nie zostało zaobserwowane w wyłodo-

podochodzenia zewnętrznego (rys. 3a). Pomiary przy napięciu 2,6 kV (rys. 3b) wykazały brak wyładowań niepełnych, zaobserwowano jedynie okresowe zakłócenia sygnału pomiarowego. Podwyższenie napięcia probierczego do 6,8 kV skutkuje pojawieniem się impulsów napięciowych o amplitudzie do 45 mV, będących następstwem wyładowań niepełnych. Wyładowania pojawiają się jedynie przy narastającym zboczu sygnału probierczego (rys. 3c i 3d). Analiza w nieco dłuższym przedziale czasowym wynoszącym 200 ms, pokazuje powtarzalność impulsów napięciowych względem sygnału probierczego. Stromość narastania pojedynczego impulsu TEV wynosi około 6 ns a czas trwania sygnału około 2 μs (rys. 3e).



b) wartość skuteczna napięcia probierczego 2,6 kV, czas pomiaru 20 ms

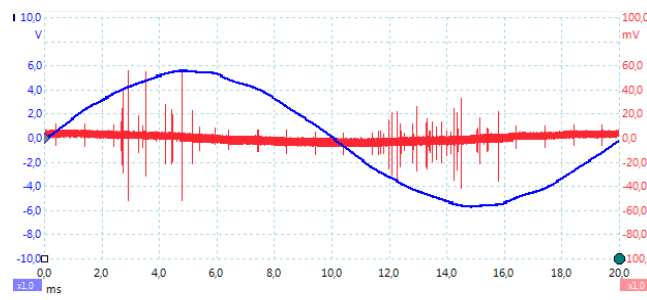


d) wartość skuteczna napięcia probierczego 6,8 kV, czas pomiaru 200 ms

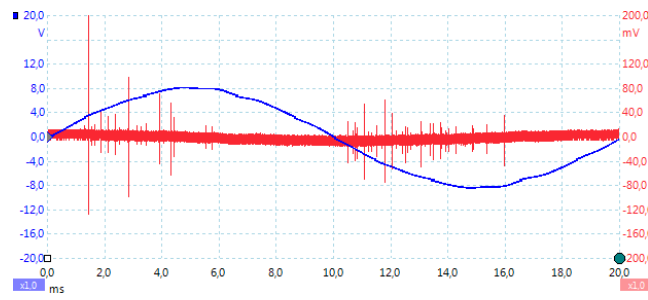
waniu typu korona. Pomiar w dłuższym przedziale czasowym potwierdza powtarzalność rejestrowanych sygnałów w poszczególnych okresach napięcia probierczego (rys. 4d). Czas trwania impulsu jest podobny jak przy wyładowaniu typu korona (rys. 4e).

• Wyładowania typu wewnętrznego

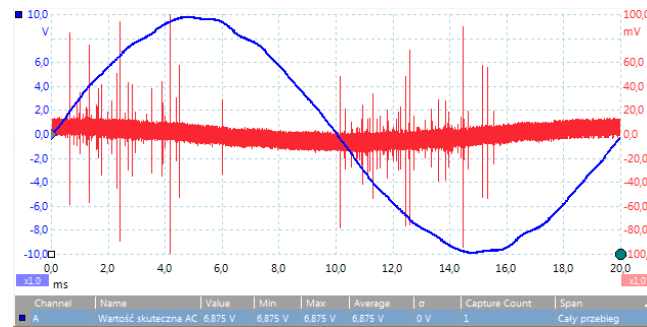
Wyładowania wewnętrzne są jedną z form wyładowań, których identyfikacja metodą nieinwazyjną jest trudna z racji zamkniętego obszaru powstawania. Fala elektromagnetyczna nie zawsze jest w stanie wydostać się z obszaru objętego wyładowaniem. Do symulacji wyładowań niepełnych wykorzystano metalowe ostrze umieszczone w materiale wykonanym z silikonu (rys. 2c). Pomiary przy napięciu probierczym 3,9 kV nie wykazują istnienia impulsów napięciowych, zwiększony jest natomiast poziom szumów w sygnale (rys. 5a). Pierwsze impulsy pojawiają się przy napięciu 5,3 kV (rys. 5b) i zwiększają swoją częstotliwość i amplitudę wraz ze zwiększeniem się wartości napięcia (rys. 5c).



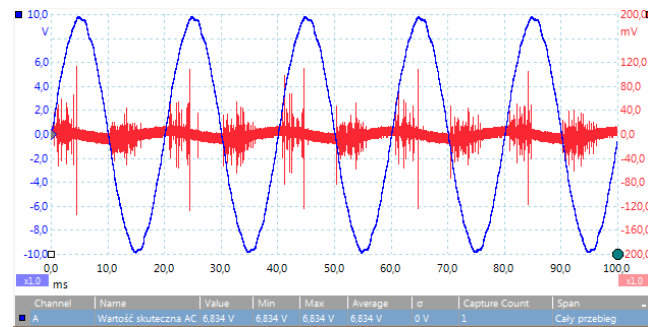
a) wartość skuteczna napięcia pobierczego 3,9 kV, czas pomiaru 20 ms



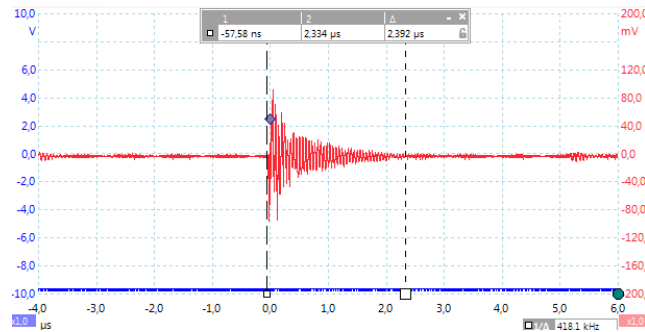
b) wartość skuteczna napięcia pobierczego 5,7 kV, czas pomiaru 20 ms



c) wartość skuteczna napięcia pobierczego 6,8 kV, czas pomiaru 20 ms

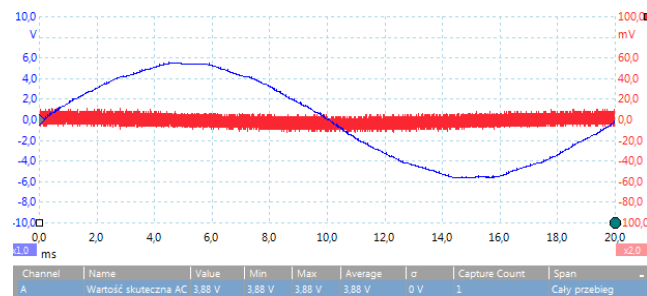


d) wartość skuteczna napięcia pobierczego 6,8 kV, czas pomiaru 100 ms

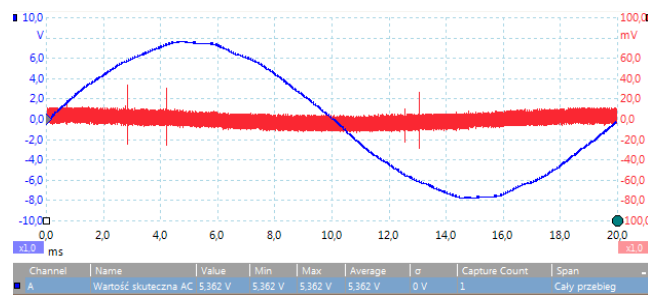


e) pojedynczy impuls napięciowy, czas pomiaru 10 μ s

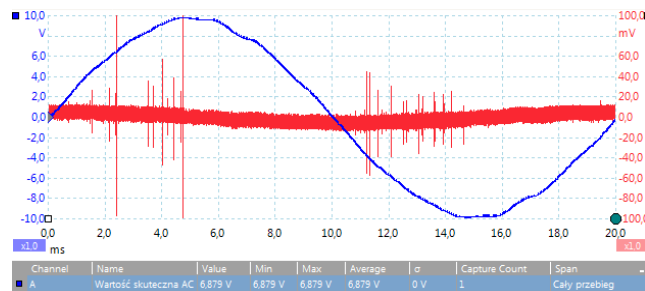
Rys. 4. Pomiary wyładowań typu powierzchniowego



a) wartość skuteczna napięcia pobierczego 3,9 kV, czas pomiaru 20 ms



b) wartość skuteczna napięcia pobierczego 5,3 kV, czas pomiaru 20 ms



c) wartość skuteczna napięcia pobierczego 6,8 kV, czas pomiaru 20 ms

Rys. 5. Pomiary wyładowań wewnętrznych

2.3. Zakłócenia podczas pomiaru wyładowań

Istotnym czynnikiem podczas badań okazują się zakłócenia, które mogą wpływać na błędną interpretację wyników. Urządzenia pracujące w sąsiedztwie mogą znacząco wpływać na rezultaty pomiarów. Przykładem są tutaj źródła wyładowcze w postaci lamp podczas procesu zapalania, zasilacze impulsowe, falowniki, regulatory tyrystorowe, iskrzące styki urządzeń. Zakłócenia mogą pochodzić również z procesów łączeniowych powstałych w systemie elektroenergetycznym, operacji mechanicznych czy też wyładowań atmosferycznych.

3. Wnioski

W pracy zaprezentowano wstępne próby detekcji wyładowań niepełnych wykorzystując przejściowe napięcie doziemne, jako jeden z symptomów ich obecności. Pomiar wykonano na układzie odwzorowującym rozdzielnicę w izolacji powietrznej z umieszczonym wewnątrz źródłem wyładowań niepełnych. Dokonane pomiary potwierdzają skuteczność wykrycia wyładowań przy wykorzystaniu tej metody. Zwiększaniu intensywności wyładowań towarzyszą większe amplitudy impulsów napięciowych, co może zostać wykorzystane do identyfikacji intensywności zjawiska. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że impulsy napięciowe towarzyszące wyładowaniom niepełnym pojawiają się jedynie na wznoszącej się części sygnału probierczego do osiągnięcia wartości szczytowej. Wstępna analiza zakłóceń pozwala zidentyfikować sygnały niebędące następstwem wyładowań niepełnych.

Literatura

- [1] Brown P.: Non-intrusive partial discharge measurements on high voltage switchgear, 1–5, 1996
- [2] Nakaoka T., Tai Y., Kamarol M., Kozako M., Hikita M.: Development of Partial Discharge Detection and Diagnostic Methods of Vacuum Circuit Breaker, 485–488, 2014

- [3] Reid A.J., Judd M.D., Duncan G.: Simultaneous Measurement of Partial Discharge Using TEV, IEC60270 and UHF Techniques, 439–442, 2012
- [4] Wang L., Ning W., Wang L., Lu H., Wang H., Jia S., Wu J.: Experimental Investigation of Partial Discharge Detection in Medium-voltage Switchgear Based on Ultra-High-Frequency Sensor, 2–5, 2013
- [5] Canadian Standards C22.2 No.193 - M1983: High voltage full-load interrupter switches
- [6] IEC 62271-102, 2013: High-voltage switchgear and controlgear - Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches
- [7] IEC 62271-103, 2011: High-voltage switchgear and controlgear - Part 103: Switches for rated voltage above 1 kV up to and including 52 kV
- [8] IEC 62478, draft 2010: High voltage test techniques: Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods
- [9] PN-EN 60270, 2003: Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiar wyładowań niepełnych

Mgr inż. Rafał Buczeko

e-mail: rafal.buczeko@pl.abb.com

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2011). Obecnie uczestnik zaocznych studiów doktoranckich w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Pracownik ABB w dziale rozwoju produktów średnich napięć. W pracy naukowej zajmuje się metodami diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych w aparaturze rozdzielczej.



Dr hab. inż. Andrzej Sikora, prof. IEL

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (2000) i Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki (2005). Od 2005 roku pracownik naukowy Wrocławskiego oddziału Instytutu Elektrotechniki. Specjalizuje się w doskonaleniu i wykorzystaniu zaawansowanych technik pomiarowych, a w szczególności mikroskopii sił atomowych w badaniu materiałów elektrotechnicznych.



otrzymano/received: 15.09.2015

przyjęto do druku/accepted: 01.07.2016