

doi:10.15199/48.2022.10.43

Analiza zmienności w czasie sygnałów generowanych przez wyładowania niezupełne

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań podstawowych, w ramach których dokonano analizy zmienności w czasie sygnałów elektrycznych generowanych przez wyładowania niezupełne (WZN) przy uwzględnieniu wpływu rodzaju materiału dielektrycznego. Celem badań jest pogłębienie wiedzy o samym zjawisku WZN i wskazanie nowych, nie dostatecznie poznanych do tej pory jego aspektów. Przedstawione wyniki potwierdziły, że każdy z przebadanych materiałów dielektrycznych emituje indywidualne sygnały elektryczne, które w różnym stopniu zmieniają się w czasie.

Abstract. The article presents the results of experimental basic research, which analyzed the variability in time of electrical signals generated by partial discharges (PD), taking into account the influence of the type of dielectric material. The aim of the research is to deepen the knowledge about the PD phenomenon itself and to identify new, not yet sufficiently known, aspects of it. The presented results confirmed that each of the tested dielectric materials emits individual electrical signals that vary to a different extent over time. (**Analysis of the variability in time of signals generated by partial discharges**).

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, dielektryki, analiza sygnałów, wysokie napięcie.

Keywords: partial discharge, dielectrics, signal processing, high voltage.

Wstęp

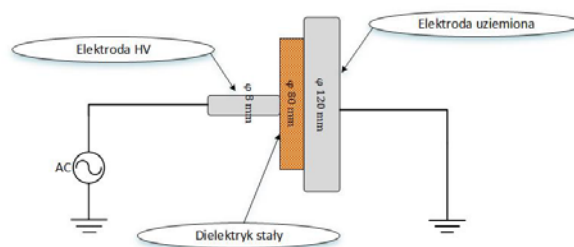
Wyładowania niezupełne (WZN) są jednym z podstawowych wskaźników stanu układu izolacyjnego urządzeń wysokiego napięcia [1, 2]. Jest to zjawisko wysoce niepożądane i w sytuacji niekontrolowanego jego rozwoju prowadzić może do całkowitego przebicia układu izolacyjnego, a w konsekwencji do poważnych awarii w systemie elektroenergetycznym [3]. W celu wykrywania i oceny WZN stosowanych jest obecnie wiele metod pomiarowych [4]. Każda z metod bazuje na innych zjawiskach fizycznych towarzyszących generacji WZN. Podstawową metodą pomiaru i analizy WZN jest metoda elektryczna, która jako jedyna jak do tej pory została znormalizowana i pozwala na kalibrowany pomiar [5]. Innymi popularnymi metodami stosowanymi powszechnie w diagnostyce WZN w warunkach eksploatacyjnych są metoda ultra wysokich częstotliwości (UHF) [6, 7] i emisji akustycznej (EA) [8, 9], które obok możliwości detekcji WZN pozwalają także na lokalizację źródła [10, 11]. W przypadku urządzeń z izolacją olejową powszechnie wykorzystuje się także metodę analizy gazów rozpuszczonych w oleju (DGA). Jednakże metoda DGA służy jedynie jako wskaźnik informujący o podejrzeniu WZN i sama w sobie nie zapewnia możliwości bardziej szczegółowej analizy samego zjawiska [12]. Obecnie w ramach publikowanych wyników badań naukowych poruszanych jest wiele wątków związanych z analizą WZN. Najczęściej poruszamy się m.in. ulepszanie metod klasyfikacji WZN z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji [13], optymalizacja algorytmów lokalizacji WZN [14] czy metody odsumowania i ekstrakcji cech [15–17].

Mimo że problematyka pomiarów i analizy WZN jest bardzo powszechna we współczesnej literaturze naukowej niewielu autorów podejmuje próby analizy zmienności samego zjawiska w czasie. W cyklu prac [18–20] podjęto próby wieloaspektowej i wieloparametrycznej analizy zmienności szeregu sygnałów emitowanych przez WZN w czasie. Niniejszy artykuł jest uzupełnieniem opublikowanych do tej pory wyników badań w tym zakresie, a wyniki tu przedstawione są efektem badań podstawowych nienakierowanych bezpośrednio na zastosowania przemysłowe. Celem tego artykułu jest zatem pogłębienie wiedzy o samym zjawisku WZN i wskazanie nowych, nie dostatecznie poznanych do tej pory jego aspektów, w

szczególności zbadania wpływu typu materiału dielektrycznego oraz czasu trwania WZN na sygnały elektryczne przez nie emitowane. Mimo, że same badania nie były nakierowane na bezpośrednio zastosowania praktyczne, osiągnięte wyniki wskazują na potencjalne możliwości aplikacyjne pod warunkiem rozszerzenia zakresu badań.

Narzędzia i metody badań

Przedstawiane badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Eksperyment zakładał przelazowanie trzech scenariuszy bazujących na różnych materiałach (dielektrykach stałych): preszpanie, teflonie i szkle. Kluczowym założeniem było nieprzerwalne generowanie stabilnych WZN przez możliwie długi czas, przy stałych warunkach pomiarowych, dla każdego ze scenariuszy. Modelowym układem, w którym generowano WZN był układ pręt-płyta, z dielektrykiem stałym umieszczonym między elektrodami (rys.1). Elektrode wysokonapięciową stanowił mosiężny pręt o średnicy 8 mm. Elektroda uziemiona była stalową płytą o średnicy 120 mm i grubości 10 mm. Wszystkie krawędzie obu elektrod miały zaokrąglone krawędzie (1 mm). Pomiędzy obiema współosiowo ustawionymi elektrodami umieszczono płytę o grubości 8 mm i średnicy 15 cm, wykonaną w zależności od scenariusza z preszpanu, teflonu lub szkła.

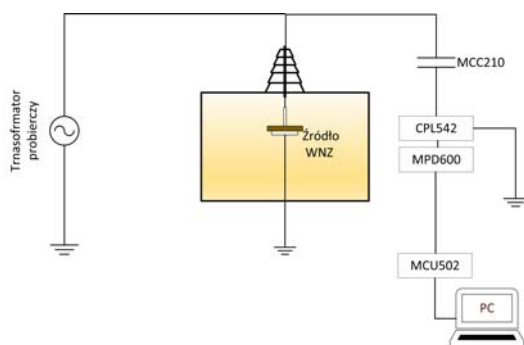


Rys.1. Źródło WZN wykorzystane w badaniach

Źródło WZN umieszczone było w stalowej kadzi o wymiarach 60 cm × 50 cm × 40 cm wypełnionej nowym izolacyjnym olejem mineralnym. Po serii badań wstępnych ustalono warunki metrologiczne prowadzonego eksperymentu, w szczególności: poziom napięcia wynosił

1,3 napięcia zapłonu dla każdego ze scenariuszy, a czas przez który stabilnie generowano WNZ w każdym ze scenariuszy wynosił 168 h. Wyznaczone eksperymentalnie wartości napięcia zapłonu dla badanych scenariuszy wynosiły 23,3 kV, 22,7 kV i 23,6 kV odpowiednio dla preszpanu, teflonu i szkła.

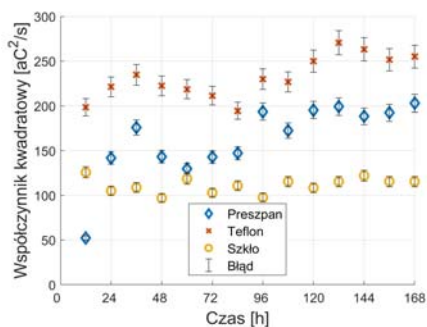
Do rejestracji sygnałów elektrycznych generowanych przez WNZ wykorzystano układ pomiarowy MPD600 składający się z kondensatora pomiarowego MCC210, impedancji pomiarowej CPL542, jednostki pomiarowej MPD600 i jednostki akwizycyjnej MCU502 (rys.2). Podczas pomiarów rejestrowano wartości ładunku pozornego każdego WNZ oraz przebiegi czasowe impulsów napięciowych przez nie generowanych. Pomiarów sygnałów przeprowadzono co 12 h i każda z rejestracji trwała 10 min, co dawało w sumie 14 pomiarów w każdej z serii pomiarowych dla każdego ze scenariuszy. W celu analizy powtarzalności uzyskanych wyników pomiarów każdego ze scenariuszy powtórzono 5 razy. Po każdej serii wymieniano płytkę dielektryka stałego, elektrody oraz olej na nowe, o takich samych parametrach. Ocenę powtarzalności uzyskanych wyników pomiarowych przeprowadzono na podstawie analizy statystycznej. Do zamodelowania rozkładu analizowanej populacji zastosowano uogólniony rozkład wartości ekstremalnych (GEV), który okazał się optymalny. Analiza błędów została oparta na progach ufności, a wszystkie wyniki końcowe zaprezentowano z uwzględnieniem 95% progów ufności. Ogólnym celem niniejszych badań była analiza zmienności sygnałów elektrycznych emitowanych przez WNZ przy uwzględnieniu wpływu rodzaju materiału dielektrycznego.



Rys.2. Układ pomiarowy wykorzystany w badaniach

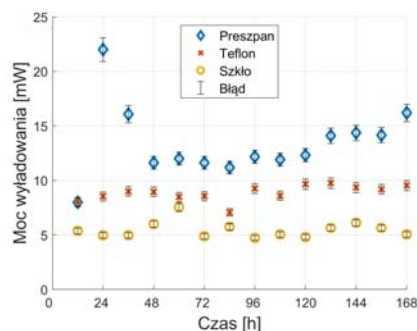
Wyniki i dyskusja

Jednym z kluczowych parametrów opisujących zjawisko WNZ jest ładunek pozorny. Jednakże wartość ładunku pozornego WNZ wykazuje dużą zmienność i losowość, co znacznie utrudnia jednoznaczną interpretację jego wartości w długich oknach pomiarowych. Znacznie lepszym rozwiązaniem w takim przypadku jest analiza tzw. współczynnika kwadratowego (D), który uwzględnia zarówno wartość ładunku jak i jego uśrednioną wartość w określonym przedziale czasu (niezależnie od polaryzacji). Rysunek 3 ilustruje wyniki pomiaru zmienności D dla trzech analizowanych scenariuszy. Największą zmienność zaważyć można w pierwszych 48 h eksperymentu dla preszpanu. W tym przedziale czasu wartości D wzrastają przeszło 3 krotnie. Pozostałe scenariusze nie wykazują tak dużych zmienności, najbardziej stabilne wyniki zaobserwowano dla szkła (przedział ok. 95-130 aC²/s). Po około 72 h, w przypadku wszystkich scenariuszy zaobserwowano powolny trend wzrostowy wartości D.



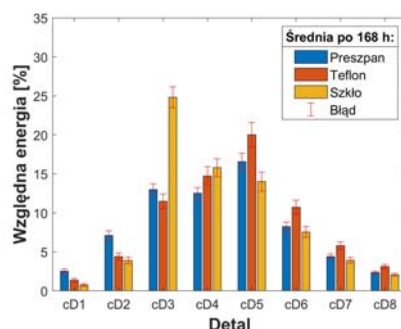
Rys.3. Wyniki pomiarowe wartości współczynnika kwadratowego

Następna z analizowanych wielkości wiąże wartość ładunku poszczególnych WNZ z chwilową wartością napięcia, przy którym doszło do WNZ. Wielkość ta to moc wyładowania (P), a wyniki jej pomiaru przedstawiono na rysunku 4. Podobnie jak w przypadku D, największa zmienność P pojawia się dla preszpanu podczas pierwszych 48 h eksperymentu. Po 24 h wartość P wzrasta ponad trzykrotnie (od ok. 7 mW do ponad 22 mW), by po kolejnych 24 h gwałtownie spaść (do ok. 11 mW). Wyniki dla dwóch pozostałych scenariuszy wykazują niemal stałą wartość w czasie, jedynie z niewielkimi fluktuacjami nie przekraczającymi 10%.



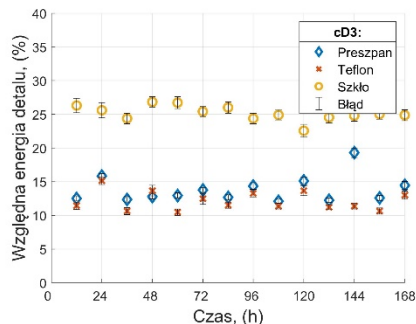
Rys.4. Wyniki pomiarowe wartości mocy wyładowania

Druga część analizy wyników pomiarowych poświęcona była przebiegom czasowym impulsów napięciowych generowanych przez WNZ. Do opisu zmienności tych sygnałów wykorzystano dwie metody ekstrakcji cech, bazujące na dyskretnej transformacji falkowej (DWT) oraz na analizie gęstości widmowej mocy (PSD). Pierwsza z nich polegała na wyznaczeniu DWT dla zarejestrowanych sygnałów, a następnie obliczeniu względnego udziału energii poszczególnych detali w sumarycznym sygnale. Metodę tę nazwano analizą względnego udziału energii (WUE).



Rys.5. Wyniki analizy WUE dla 168 h eksperymentu

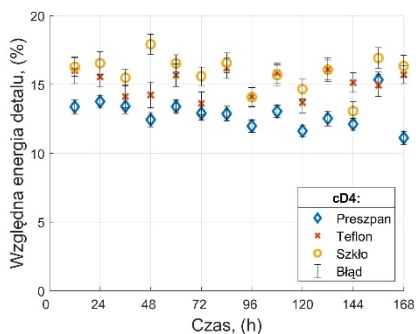
Na rysunku 5 pokazano wyniki analizy WUE wyznaczone dla wszystkich pomiarów przeprowadzonych w ramach eksperymentu (uśrednione dla 168 h). Wyniki wskazują wyraźnie, że największa ilość energii analizowanych sygnałów występuje dla detali cD3, cD4 i cD5, co w przypadku tego eksperymentu odpowiada w przybliżeniu pasmom odpowiednio 8-4 MHz, 4-2 MHz i 2-1 MHz. Kolejnym istotnym spostrzeżeniem jest fakt, że każdy ze scenariuszy charakteryzuje się innym pasmem dominującym: cD3 dla szkła, cD5 dla teflonu i niemal równy udział cD3, cD4 i cD5 dla preszpanu ($\pm 2\%$). Ta właściwość może być potencjalnie wykorzystana do optymalizacji metod klasyfikacji i oceny WNZ występujących w różnych rodzajach dielektryków. Do celów analizy zmienności impulsów napięciowych emitowanych przez WNZ bazującej na WUE wybrano zatem trzy detale o największym (znaczącym z punktu widzenia metrologicznego) udziale energii: cD3, cD4 i cD5. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki dla cD3. W przypadku szkła udział energii tego detalu w całym sygnale przekraczał 25% podczas niemal całego eksperymentu (rys.6). Udział cD5 dla dwóch pozostałych scenariuszy oscylował w okolicach 15%. Wszystkie trzy scenariusze nie wykazywały istotnych zmienności w zakresie analizowanego parametru, a otrzymane wyniki dla preszpanu i teflonu są niemal identyczne (jedynie dla 144 h widoczna jest znaczaca rozbieżność).



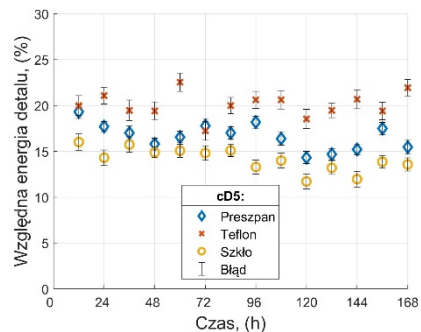
Rys.6. Zmienność cD3 w czasie eksperymentu

Następnym analizowanym detalem był cD4. Był to detal, którego udział względny był najbardziej zbliżony w każdym z trzech scenariuszy i wynosił ok 15%. Obserwując zmienność wartości cD4 w trakcie prowadzonego eksperymentu nie widać żadnych istotnych zmian ($\pm 2\%$), jednakże można zauważyć stały, nieznaczny trend malejący wraz z czasem, dla każdego z badanych materiałów (rys.7).

Ostatnim z analizowanych detali był cD5 (rys.8). W przypadku szkła i preszpanu zaważyć można niewielki trend malejący, podobnie jak dla cD4. Z kolei analiza wyników dla teflonu wskazuje na relatywnie stałą wartość w czasie, bez tendencji wzrostowych czy malejących.



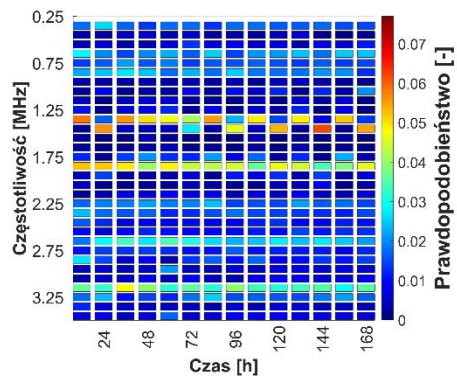
Rys.7. Zmienność cD4 w czasie eksperymentu



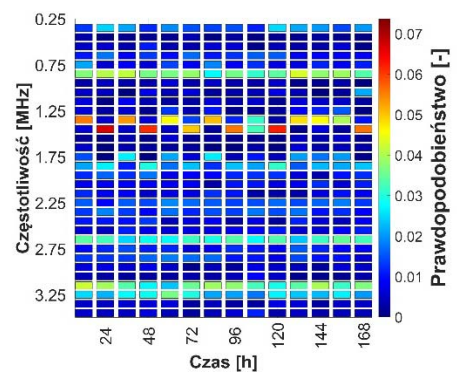
Rys.8. Zmienność cD5 w czasie eksperymentu

Ostatnia część badania zmienności sygnałów elektrycznych generowanych przez WNZ została oparta na analizie w dziedzinie częstotliwości. W tym celu wykorzystano autorską metodę ekstrakcji cech, nazwaną metodą ekstrakcji prawdopodobieństwa szczytu (EPS). EPS to metoda oparta na analizie statystycznej, która wykorzystuje PDS jako dane wejściowe. Następnie stosuje się algorytm ekstrakcji szczytów w sygnale, za pomocą którego wyszukuje się lokalne maksima w PSD, zgodnie z przyjętymi założeniami. Ostatnim krokiem proponowanej metody jest obliczenie histogramu dla wyodrębnionych maksimów dla każdego scenariusza. Histogram należy znormalizować za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Metoda ta w przeciwieństwie do wielu innych proponowanych metod ekstrakcji cech z PSD nie skupia się na amplitudzie maksimów, a na prawdopodobieństwie ich wystąpienia.

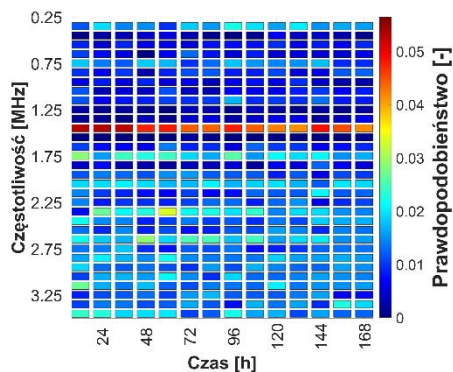
Na rysunkach 9-11 pokazano wyniki analizy EPS dla wszystkich trzech materiałów dielektrycznych wykorzystanych w eksperymencie.



Rys.9. Analiza EPS dla preszpanu



Rys.10. Analiza EPS dla teflonu



Rys.11. Analiza EPS dla szkła

W przypadku preszpanu (rys.9) widać największą dominację częstotliwości ok. 1,3 MHz i 1,8 MHz. Wyniki dla teflonu (rys.10) pokazują że największe prawdopodobieństwo wystąpienia lokalnych maksimów w PSD jest dla 0,8 MHz, 1,3 MHz i ok. 3,2 MHz. Największe zróżnicowanie wyników zaobserwowano dla szkła (rys.11), gdzie z jednej strony widać ewidentną dominację częstotliwości ok. 1,4 MHz, z drugiej zaś strony prawdopodobieństwo maksimów lokalnych między 1,7 MHz a 3,5 MHz jest niemal stałe, co wskazuje, że maksima pojawiają się w tym zakresie regularnie.

Podsumowanie

W niniejszym artykule zaprezentowano analizę wpływu rodzaju materiału dielektrycznego na sygnały elektryczne generowane przez WNZ. Do obróbki wyników pomiarowych zaproponowano alternatywne metody ekstrakcji cech sygnałów, które pozwoliły zwizualizować zmienność tych sygnałów w czasie. Przedstawione wyniki potwierdziły, że każdy z przebadanych materiałów dielektrycznych emituje indywidualne sygnały elektryczne, które w różnym stopniu zmieniają się w czasie. Ponadto wykazano, że równoczesne zastosowanie proponowanych dwóch niezależnych metod ekstrakcji cech, WUE i EPS, znacząco zwiększa precyzję analizy i poszerza potencjalne możliwości interpretacji wyników pomiarowych. Przedstawione wyniki wskazują, że mogą one znaleźć zastosowanie w zaawansowanej analizie sygnału, m.in. do klasyfikacji WNZ za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji. Szczególnie wyniki uzyskane dla preszpanu sugerują, że cechy analizowane w niniejszym badaniu mogą być potencjalnie wykorzystane do wsparcia oceny stadium rozwoju WNZ w tym materiale. Celowe wydaje się więc prowadzenie dalszych badań nad zastosowaniem przedstawionych metod ekstrakcji cech do klasyfikacji sygnałów WNZ.

Autor: dr inż. Michał Kunicki, Politechnika Opolska, Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Próżkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: m.kunicki@po.edu.pl.

LITERATURA

[1] Firuzi K., Vakilian M., Phung B. T., Blackburn T. R., A Hybrid transformer pd monitoring method using simultaneous iec60270 and rf data, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34

(2019), n.4, 1374–1382

[2] Xie P., Analysis of fault of insulation aging of oiled paper of a large-scale power transformer and the prediction of its service life, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14 (2019), n.8, 1139–1144

[3] Piotrowski T., Rozga P., Kozak R., Comparative analysis of the results of diagnostic measurements with an internal inspection of oil-filled power transformers, *Energies*, 12 (2019), n.2155,

[4] Mondal M., Kumbhar G. B., Detection, Measurement, and Classification of Partial Discharge in a Power Transformer: Methods, Trends, and Future Research, *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)*, 35 (2018), n.5, 483–493

[5] Romano P., Presti G., Imburgia A., Candela R., A new approach to partial discharge detection under DC voltage, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 34 (2018), n.4, 32–41

[6] Siegel M., Coenen S., Beltle M., Tenbohlen S., Weber M., Fehlmann P., Hoek S. M., Kempf U., Schwarz R., Linn T., Calibration Proposal for UHF Partial Discharge Measurements at Power Transformers, *Energies*, 12 (2019), 3058

[7] Zhou X., Wu X., Ding P., Li X., He N., Zhang G., Zhang X., Research on transformer partial discharge uhf pattern recognition based on cnn-1stm, *Energies*, 13 (2019), n.1,

[8] Avzayesh M., Abdel-Hafez M. F., Al-Masri W. M. F., Alshabi M., El-Hag A. H., A Hybrid Estimation-Based Technique for Partial Discharge Localization, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69 (2020), n.11, 8744–8753

[9] Sikorski W., Development of acoustic emission sensor optimized for partial discharge monitoring in power transformers, *Sensors*, 19 (2019), n.8,

[10] Chai H., Phung B. T., Mitchell S., Application of UHF sensors in power system equipment for partial discharge detection: A review, *Sensors (Switzerland)*, 19 (2019), n.5,

[11] Sikorski W., Walczak K., PDtracker – system monitoringu wyladowań niezupełnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), n.10, 45–49

[12] Piotrowski T., Rozga P., Kozak R., Szymanski Z., Using the analysis of the gases dissolved in oil in diagnosis of transformer bushings with paper-oil insulation—a case study, *Energies*, 13 (2020), n.24,

[13] Raymond W. J. K., Ilias H. A., Bakar A. H. A., Mokhlis H., Partial discharge classifications: Review of recent progress, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 68 (2015), 164–181

[14] Kraetge A., Hoek S., Koch M., Koltunowicz W., Robust measurement, monitoring and analysis of partial discharges in transformers and other HV apparatus, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20 (2013), n.6, 2043–2051

[15] Ghorat M., Gharehpetian G. B., Latifi H., Hejazi M. A., A new partial discharge signal denoising algorithm based on adaptive dual-tree complex wavelet transform, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67 (2018), n.10, 2262–2272

[16] Búa-Núñez I., Posada-Román J. E., García-Souto J. A., Multichannel detection of acoustic emissions and localization of the source with external and internal sensors for partial discharge monitoring of power transformers, *Energies*, 14 (2021), n.23,

[17] Soltani A. A., El-Hag A., Denoising of radio frequency partial discharge signals using artificial neural network, *Energies*, 12 (2019), n.18,

[18] Kunicki M., Behavior of Partial Discharges in Mineral Oil with Solid Dielectric Barrier under Long-Term AC Voltage, in *IEEE 2nd International Conference on Dielectrics*, 2018, 1–5

[19] Kunicki M., Variability of the Electrical Signals Generated by PDs in Mineral Oil under Long-term AC Voltage, in *2019 Progress in Applied Electrical Engineering, PAEE 2019*, 2019

[20] Kunicki M., Variability of the Acoustic Emission Signals Generated by Partial Discharges in Mineral Oil, *Archives of Acoustics*, 44 (2019), n.2, 339–348