

Analiza widm optycznych emitowanych przez powierzchniowe wyładowania elektryczne w cieczach elektroizolacyjnych przy napięciu stałym

Streszczenie. Celem przedstawionych w artykule badań jest analiza widm optycznych emitowanych przez wyładowania elektryczne w cieczach elektroizolacyjnych, takich jak ester syntetyczny, ester naturalny oraz olej mineralny, zarejestrowanych przy napięciu stałym. Badania przeprowadzono na jednoźródłowym układzie elektrod typu ostrze-płyta, z dielektrykiem stałym umieszczonym między nimi. Analiza widm optycznych ma na celu wskazanie indywidualnych cech i sygnatur poszczególnych rodzajów wyładowań, które mogą się różnić w zależności od rodzaju cieczy elektroizolacyjnej. Rezultaty badań mogą posłużyć do budowy bazy wiedzy i przyczynić się do dalszego rozwoju prac badawczych nad mechanizmami wyładowań elektrycznych w cieczach oraz ulepszenia metod diagnostycznych wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.

Abstract. The aim of the research presented in this article is to analyze the optical spectra emitted by electrical discharges in insulating liquids, such as synthetic ester, natural ester, and mineral oil, recorded under direct current (DC) voltage. The studies were conducted on a single-source electrode system of the needle-plate type, with a solid dielectric placed between them. The analysis of optical spectra aims to identify the individual characteristics and signatures of different types of discharges, which may vary depending on the type of insulating liquid. The research results can contribute to the development of a knowledge base and further advancement of studies on the mechanisms of electrical discharges in liquids, as well as improvements in diagnostic methods for high-voltage power equipment. (*Analysis of Optical Spectra Emitted by Electrical Discharges in Insulating Liquids under Direct Current (DC) Voltage*).

Słowa kluczowe: wyładowania elektryczne, promieniowanie optyczne, ciecz elektroizolacyjna.

Keywords: electrical discharges, optical radiation, insulating liquids.

Wstęp

Ciecze elektroizolacyjne odgrywają kluczową rolę w systemach elektroenergetycznych, zapewniając izolację elektryczną oraz efektywne chłodzenie urządzeń takich jak m.in. transformatory, kondensatory i kable. Dzięki swoim właściwościom dielektrycznym, chemicznym i termicznym, ciecze te umożliwiają bezpieczną i niezawodną pracę urządzeń wysokiego napięcia, minimalizując ryzyko awarii i przedłużając ich żywotność.

Najpopularniejsze typy cieczy elektroizolacyjnych obejmują m.in. [1,2]:

- oleje mineralne: tradycyjnie stosowane w transformatorkach i innych urządzeniach elektroenergetycznych, znane z dobrych właściwości izolacyjnych i chłodzących.
- estry syntetyczne: charakteryzują się lepszą biodegradowalnością i wyższą stabilnością termiczną niż oleje mineralne.
- estry naturalne: produkowane z odnawialnych surowców, cechują się wysoką biodegradowalnością i niską toksycznością, są one coraz częściej stosowane jako alternatywa dla olejów mineralnych, szczególnie w aplikacjach, gdzie ochrona środowiska jest priorytetem.

W zależności od typu cieczy elektroizolacyjnej oraz rodzaju wyładowania elektrycznego, zachodzą w nich zjawiska emisji akustycznej, radiacyjnej oraz optycznej. Emisja akustyczna jest generowana przez szybkie zmiany ciśnienia w cieczy podczas wyładowań, natomiast emisja radiacyjna obejmuje promieniowanie elektromagnetyczne w różnych zakresach fal [3].

Wyładowania elektryczne w cieczach elektroizolacyjnych, takich jak oleje transformatorowe czy estry, powodują jonizację cząsteczek cieczy, prowadząc do powstania wolnych jonów. Następująca po jonizacji rekombinacja tych jonów skutkuje emisją fotonów. Proces ten generuje promieniowanie optyczne obejmujące różne zakresy spektralne, w zależności od energii poziomów

elektronowych, pomiędzy którymi zachodzą przejścia [4,5]. Emisja ta obejmuje m.in. zakres promieniowania ultrafioletowego (UV), światła widzialnego (VIS) oraz bliskiej podczerwieni (NIR).

Spektrofotometria optyczna jest jedną z najczęściej stosowanych metod do analizy promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne, m.in. w cieczach elektroizolacyjnych [6-9]. Technika ta pozwala na dokładne zmierzenie widma emitowanego promieniowania, co umożliwia analizę różnych zakresów promieniowania optycznego.

Widma promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne w różnych cieczach elektroizolacyjnych, szczególnie w kontekście napięcia przemiennego, są dobrze opisane w literaturze. Wiele badań skoncentrowało się na analizie tych widm, dostarczając szczegółowych informacji na temat mechanizmów emisji, charakterystyk spektralnych oraz wpływu na nie różnych parametrów [10,11]. Natomiast charakterystyki widmowe emitowane przez wyładowania elektryczne przy napięciu stałym są słabo rozpoznane.

Celem przedstawionych w artykule badań jest analiza widm optycznych emitowanych przez wyładowania elektryczne w cieczach elektroizolacyjnych, takich jak ester syntetyczny MIDEŁ 7131, ester naturalny MIDEŁ 1204 oraz olej mineralny ORLEN Trafo EN, przy napięciu stałym. Badania zostały przeprowadzone na jednoźródłowym układzie elektrod ostrze-płyta, z dielektrykiem stałym umieszczonym między nimi, modelującym wyładowania powierzchniowe. Analiza widm optycznych ma na celu wskazanie indywidualnych cech i sygnatur poszczególnych rodzajów wyładowań. Rezultaty tych badań mogą posłużyć do budowy bazy wiedzy i przyczynić się do dalszego rozwoju prac badawczych nad mechanizmami powstawania wyładowań elektrycznych w cieczach, a także do ulepszeń i optymalizacji metod diagnostyki wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych.

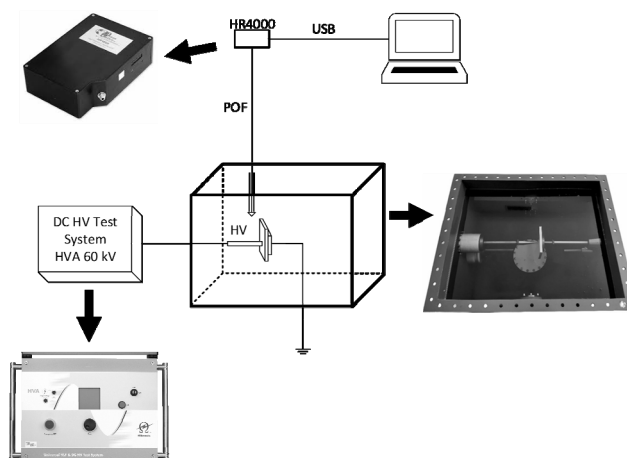
Metodologia

W badaniach wykorzystano trzy różne, fabrycznie nowe ciecze elektroizolacyjne:

- Ester syntetyczny MIDEL 7131 - charakteryzuje się wysoką wytrzymałością elektryczną oraz dobrymi właściwościami chłodzącymi,
- Ester naturalny MIDEL 1204 - cechuje się wysoką biodegradowalnością oraz wysoką stabilnością chemiczną,
- Olej mineralny ORLEN Trafo EN - klasyczny olej mineralny stosowany w transformatorach, charakteryzujący się dobrymi właściwościami izolacyjnymi i chłodzącymi.

Dla każdej z cieczy elektroizolacyjnych wykonano pomiary przy użyciu układu elektrod typu ostrze-dielektryk stały-płyta. Elektroda z przyłożonym napięciem miała kształt ostrza, jako dielektryk stały zastosowano preszpan o wymiarach 90,0 mm x 90,0 mm i grubości 4,0 mm, płyta uziemiona metalowa o śr. 80,0 mm. Układ ten pozwalał na badanie wyładowań powierzchniowych. Różne układy elektrod mają istotny wpływ na charakterystykę wyładowań elektrycznych, zwłaszcza w cieczach elektroizolacyjnych. Układ ostrze-dielektryk stały jest często stosowany w badaniach laboratoryjnych ze względu na jego zdolność do koncentracji pola elektrycznego [12,13]. W takim układzie, wyładowania powierzchniowe mogą być łatwo inicjowane i obserwowane.

Pomiary przeprowadzono w identycznych warunkach metrologicznych, aby zapewnić porównywalność wyników. Wszystkie eksperymenty wykonano w stałej temperaturze, która wynosiła 20°C. W ramach przeprowadzonych badań nie analizowano wpływu temperatury ani stopnia zanieczyszczenia cieczy na wyładowania elektryczne. Na rysunku 1 przedstawiono schemat układu pomiarowego.



Rys.1. Schemat układu pomiarowego

Układ elektrod został umieszczony w kadzi pomiarowej o wymiarach 50 cm x 40 cm x 40 cm, wypełnionej około 80 litrami cieczy elektroizolacyjnej. Konstrukcja kadzi zapewnia pełną izolację od zewnętrznych źródeł światła, co eliminuje wpływ tego typu zakłóceń na wyniki pomiarów.

Jako źródło wysokiego napięcia zastosowano generator HVA 60 firmy b2 electronics, który umożliwia pracę w trybie sinusoidalnym (AC) do 62 kV szczytowo i 44 kV RMS, w trybie stałoprądowym (DC) ± 60 kV oraz prostokątnym do 60 kV. Urządzenie charakteryzuje się wysoką precyzją i stabilnością napięcia, co pozwala również wykorzystać generator jako źródło zasilania przy eksperymentach w cieczach elektroizolacyjnych.

Do rejestracji widm optycznych zastosowano spektrofotometr o wysokiej rozdzielczości HR4000, który

został zbudowany w oparciu o matrycę CCD (ang. Charge Coupled Device). Urządzenie pracuje w zakresie widmowym 200-1100 nm, umożliwiając detekcję i analizę promieniowania w ultrafiolecie (UV), świetle widzialnym (VIS) oraz bliskiej podczerwieni (NIR). Aparatura posiada możliwość zmiany przedziału spektralnego i rozdzielczości optycznej w zależności od dobranej siatki i szczeliny (apertury) wejściowej.

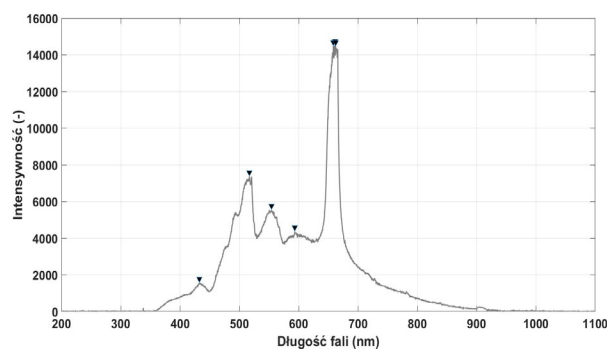
Przed każdą serią pomiarową spektrofotometr był kalibrowany poprzez wyznaczenie poziomu tła dla badanego zakresu promieniowania optycznego. Kalibracja ta umożliwiła ograniczenie zakłóceń wynikających z przetwarzania sygnału optycznego na postać cyfrową.

Podczas pomiarów głowica światłowodu, połączonego z spektrofotometrem (POF), była umieszczona w odległości ok. 20 mm od miejsca generacji wyładowań elektrycznych, co wynikało z apertury numerycznej (kąta akceptacji) zastosowanego światłowodu. Pomiary prowadzono w zakresie widmowym 200-1100 nm, rejestrując intensywność promieniowania emitowanego przez wyładowania.

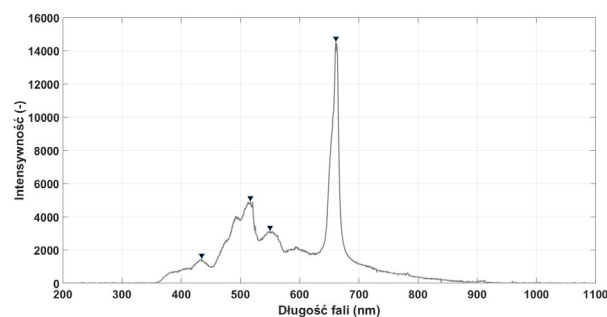
Występowanie w sposób ciągły powierzchniowych wyładowań niepełnych, rozpoczęło się przy napięciu zasilania około 5,2 kV i od tego progu było możliwe do zarejestrowania. Ze względu na utrzymujący się charakter zjawiska, zastosowano gradację napięcia zasilania wynoszącą 5 kV co 5 minut, przy czym pomiar pojedynczej próbki trwał około 20 minut.

Rezultaty

Widma optyczne były analizowane pod kątem charakterystycznych składowych widm ciągłych i pasmowych oraz dominujących składowych długości fal, występujących w zakresie UV, VIS i NIR (200 nm – 1100 nm). Na rysunkach 2-4 przedstawiono uzyskane widma dla różnych cieczy elektroizolacyjnych, które posłużą do identyfikacji indywidualnych cech i sygnatur wyładowań powierzchniowych dla poszczególnych rodzajów cieczy.

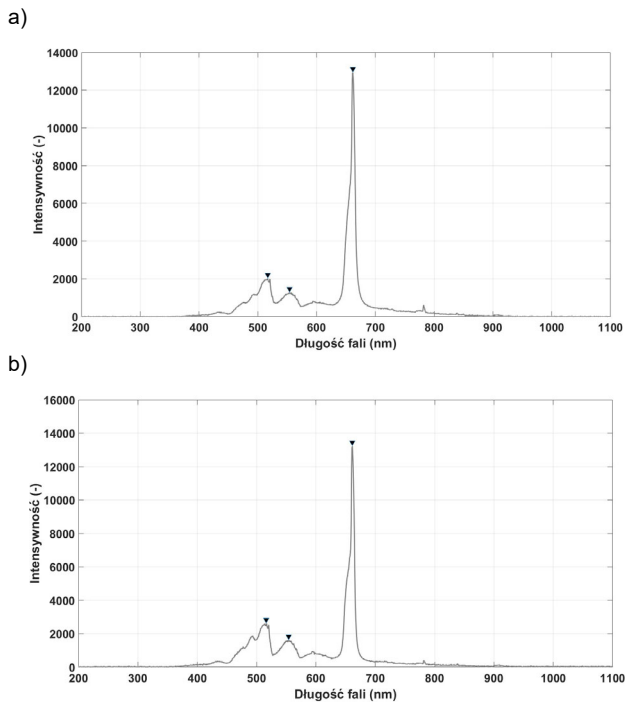


a)

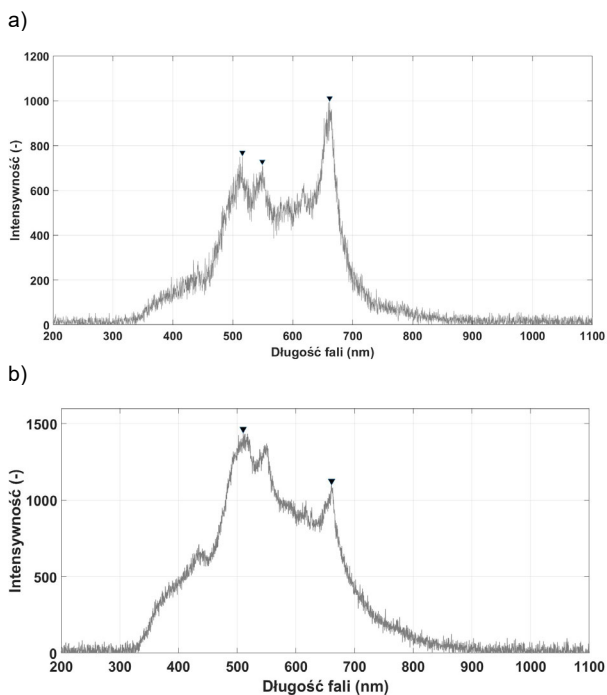


b)

Rys.2. Widmo promieniowania optycznego emitowane przez wyładowania powierzchniowe w oleju mineralnym: (a) przy polaryzacji ujemnej ostrza; (b) przy polaryzacji dodatniej ostrza



Rys.3. Widmo promieniowania optycznego emitowane przez wyładowania powierzchniowe w estrze naturalnym: (a) przy polaryzacji ujemnej ostrza; (b) przy polaryzacji dodatniej ostrza



Rys.4. Widmo promieniowania optycznego emitowane przez wyładowania powierzchniowe w estrze syntetycznym: (a) przy polaryzacji ujemnej ostrza; (b) przy polaryzacji dodatniej ostrza

W każdym z analizowanych przypadków (olej mineralny, ester naturalny, ester syntetyczny) jednoźródłowe wyładowania elektryczne generowane w układzie elektrod ostrze-płyta, z dielektrykiem stałym umieszczonym między nimi, wykazują różny kształt charakterystyk widmowych emitowanego promieniowania optycznego. Różnice te potwierdzają odmienny skład chemiczny i właściwości fizyczne badanych cieczy elektroizolacyjnych i wskazują, że zachodzące mechanizmy, m.in. rekombinacji jonów, mogą się nieco różnić w zależności od rodzaju cieczy.

Ponadto, na podstawie analizy uzyskanych widm promieniowania optycznego, zarówno przy polaryzacji

ujemnej, jak i dodatniej, stwierdzono, że polaryzacja napięcia nie ma znaczącego wpływu na kształt charakterystyk widmowych. Kształt charakterystyk widmowych w zakresie spektralnym UV, VIS i NIR pozostaje podobny, wykazując tylko nieznaczne różnice, co potwierdza, że procesy odpowiedzialne za emisję promieniowania są stabilne i niezmiennie w odniesieniu do kierunku przyłożonego pola elektrycznego. Stabilność procesów rekombinacji, niezależnie od polaryzacji, oznacza, że można stosować jednolite podejście w analizach widm promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne w cieczach elektroizolacyjnych przy napięciu stałym.

Na podstawie uzyskanych widm promieniowania optycznego zidentyfikowano dominujące składowe długości fal dla trzech rodzajów cieczy elektroizolacyjnych: estru syntetycznego, estru naturalnego oraz oleju mineralnego, przy napięciu stałym (DC) oraz porównano je z rezultatami uzyskanymi dla napięcia przemiennego (AC), które zostały opisane m.in. w publikacjach [11,14]. Zestawienie zbiorcze przedstawiono w tabeli 1.

Dla wszystkich badanych cieczy elektroizolacyjnych zidentyfikowano podobne dominujące składowe długości fal przy napięciu stałym. Składowe te obejmują długości fal w zakresie: 510-516 nm, 549-554 nm oraz 660-661 nm.

Tabela 1. Dominujące składowe długości fal

Rodzaj cieczy elektroizolacyjnej	Dominujące składowe długości fal (nm)		
Napięcie stałe (DC)			
Ester syntetyczny	510 – 515	549	660 - 661
Ester naturalny	516	549 – 554	661
Olej mineralny	516	549 – 551	661
Napięcie przemiennie (AC)			
Ester syntetyczny	510	549	598
Ester naturalny	517	-	598
Olej mineralny	381	512	-

Porównanie dominujących długości fal przy napięciu stałym i przemiennym wskazuje, że przemienna polaryzacja napięcia ma istotny wpływ na charakterystyki widmowe, zwłaszcza w przypadku oleju mineralnego. Przy napięciu stałym, olej mineralny wykazuje składowe podobne do estrów, jednak przy napięciu przemiennym pojawia się dominująca składowa w zakresie UV (381 nm), co nie jest obserwowane w estrach. Różnica ta może wynikać z właściwości chemicznych i fizycznych oleju mineralnego, które w przypadku oddziaływania przemiennego pola elektrycznego, rozszerzają obszar przemian energetycznych.

Podsumowanie

Badania nad widmami optycznymi emitowanymi przez wyładowania elektryczne w cieczach elektroizolacyjnych przy napięciu stałym umożliwiły wskazanie indywidualnych cech i sygnatur wyładowań powierzchniowych, które charakteryzują je na tle różnych rodzajów cieczy elektroizolacyjnych. Są to: kształt charakterystyk widmowych oraz dominujące składowe długości fal. Analizie poddano charakterystyki widmowe uzyskane dla wyładowań w trzech rodzajach cieczy elektroizolacyjnych: ester syntetyczny MIDEL 7131, ester naturalny MIDEL 1204 oraz olej mineralny ORLEN Trafo EN.

Wyniki analizy wykazały, że dominujące składowe długości fal w zakresie UV, VIS i NIR są zbliżone dla wszystkich badanych cieczy przy napięciu stałym, co sugeruje, że zachodzące mechanizmy rekombinacji jonów są w pewnym zakresie podobne i niezależnie od rodzaju cieczy. Zidentyfikowano dominujące składowe długości fal wynoszące około 510-516 nm, 549-554 nm oraz 660-661 nm.

Analiza wykazała, że polaryzacja napięcia nie ma znaczącego wpływu na charakterystyki widmowe przy napięciu stałym, natomiast przy napięciu przemiennym może prowadzić do zróżnicowanych wyników, szczególnie w przypadku oleju mineralnego.

Dalsze badania powinny obejmować różnorodne ciecz elektroizolacyjne od różnych producentów, aby ocenić wpływ składu chemicznego i jakości na charakterystyki widmowe wyładowań elektrycznych. Należy również uwzględnić różny stan techniczny cieczy, taki jak ciecz eksploatowana oraz zanieczyszczona, aby zbadać, jak zmiany w cieczy wpływają na widma promieniowania optycznego. Konieczne jest także przeprowadzenie badań nad wpływem temperatury na charakterystyki widmowe wyładowań elektrycznych w cieczach elektroizolacyjnych. Temperatura może znacząco wpływać na procesy rekombinacji jonów, co może prowadzić do zmian w emitowanym zakresie spektralnym.

Autorzy: dr inż. Michał Kozioł, e-mail: m.kozioł@po.edu.pl
prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis, e-mail: j.skubis@po.edu.pl
prof. dr hab. inż. Tomasz Boczar, e-mail: t.boczar@po.edu.pl
dr inż. Michał Kunicki, e-mail: m.kunicki@po.edu.pl
dr inż. Łukasz Nagi, e-mail: l.nagi@po.edu.pl
dr inż. Ireneusz Urbaniec, e-mail: i.urbaniec@po.edu.pl
Politechnika Opolska, Katedra Elektroenergetyki i Energii
Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, bud. nr 2, 45-758 Opole

LITERATURA

- [1] Przybyłek P, Gielniak J. Concentration analysis of gases formed in mineral oil, natural ester, and synthetic ester by discharges of high energy. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* (2018); 20 (3): 435–442
- [2] Beroual A, Khaled U, Mbolo Noah PS, Sitorus H. Comparative Study of Breakdown Voltage of Mineral, Synthetic and Natural Oils and Based Mineral Oil Mixtures under AC and DC Voltages. *Energies*. (2017); 10(4):511
- [3] Kurimský J., Rajňák M., Šárpataky M., Čonka Z., Paulovičová K., Electrical and acoustic investigation of partial discharges in two types of nanofluids, *J. Mol. Liq.*, 341 (2021), Article 117444
- [4] Schmidt, W., *Liquid state electronics of insulating liquids*. CRC Press. (1997)
- [5] Peppas G., Koullis P., Svarnas P. and Pyrgioti E. C., Electrical and optical-emission parallel study of natural ester liquids stressed by impulse high voltage, 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Bled, Slovenia, (2014), pp. 1-4
- [6] Puhan D. K., Sharma R., Thirumurthy and K. P. Meena, "Detection of Partial Discharges of Corona Type in Paper Oil Insulation System by Optical Method," 2022 IEEE 6th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Durgapur, India, (2022), pp. 348-354,
- [7] Jia, S., Jia, Y., Bu, Z., Li, S., Lv, L. and Ji, S., Detection technology of partial discharge in transformer based on optical signal. *Energy Reports*, 9, (2023), pp.98-106
- [8] Riba J-R., Application of Image Sensors to Detect and Locate Electrical Discharges: A Review. *Sensors*. (2022); 22(15)
- [9] Xia C. et al., "Multispectral Optical Partial Discharge Detection, Recognition, and Assessment," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, (2022), Art no. 7002911, pp. 1-11
- [10] Rozga P. and Tabaka P., "Spectroscopic measurements of electrical breakdown in various dielectric liquids," 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Sydney, NSW, Australia, (2015), pp. 524-527
- [11] Kozioł M. Energy Distribution of Optical Radiation Emitted by Electrical Discharges in Insulating Liquids. *Energies*. (2020);13(9):1–9.
- [12] Wang T, Cheng Y, Xu C, Li H, Cheng J, Peng G, Guo Q. Spatial Spectral Characteristics of Partial Discharge with Different Electrode Models. *Photonics*. (2023); 10(7):788
- [13] Kunicki M. Influence of the solid dielectric type on the acoustic emission signals emitted by partial discharges. *Measurement*. (2022); 205(12):1–10.
- [14] Kozioł M, Boczar T. Widma optyczne emitowane przez wyładowania elektryczne generowane w oleju elektroizolacyjnym. *Przegląd Elektrotechniczny*. (2016); 50–53