

Widma optyczne emitowane przez wyładowania elektryczne generowane w oleju elektroizolacyjnym

Streszczenie. W artykule zaprezentowano zarejestrowane metodą spektrofotometrii optycznej rozkłady widmowe promieniowania emitowanego przez wyładowania elektryczne generowane w mineralnym oleju elektroizolacyjnym. Pomiary przeprowadzono dla trzech układów iskierników: układ ostrze-ostrze, układ ostrze-płyta i układ do wyładowań powierzchniowych.

Abstract. The article presents the spectral distributions of optical radiation emitted by electrical discharges generated in electroinsulating mineral oil measured by optical spectrophotometry methods. Measurements were carried out for three basic forms of electrical discharges generated in a point-point system, point-plane system and a system for surface discharges. (**Optical spectra emitted by electrical discharges generated in the insulating oil**).

Słowa kluczowe: wyładowania elektryczne, widma optyczne, spektrofotometria optyczna, olej elektroizolacyjny.

Keywords: electrical discharges, optical spectra, optical spectrophotometry, insulating oil.

Wstęp

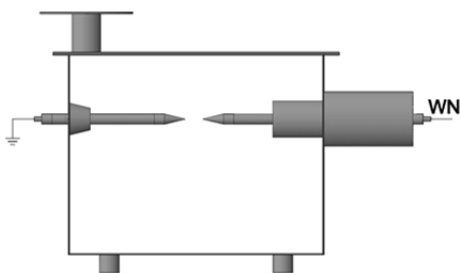
W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów rozkładów widm optycznych, generowanych przez wyładowania elektryczne w mineralnym oleju elektroizolacyjnym, zmierzonych metodą spektrofotometrii optycznej [1-8]. Do badań przyjęto jednoźródłowe wyładowania elektryczne generowane w oleju mineralnym o następujących stanach technicznych: fabrycznie nowy, eksploatowany oraz eksploatowany z pęcherzykami powietrza. Uwzględnienie stanu technicznego mineralnego oleju izolacyjnego umożliwiło porównanie wpływu różnych mechanizmów powstawania wyładowań elektrycznych na emitowane promieniowanie optyczne [9]. Analizie poddana została emisja sygnału optycznego w zakresie promieniowania ultrafioletowego (UV), światła widzialnego (VIS) oraz bliskiej podczerwieni (NIR) [7-8].

Celem przeprowadzonych badań było określenie możliwości zastosowania metody spektrofotometrii optycznej do rozpoznawania podstawowych form wyładowań elektrycznych, które mogą występować w oleju elektroizolacyjnym.

Analizowane formy wyładowań elektrycznych

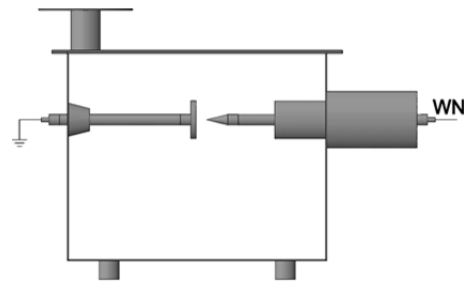
Pomiary promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne zostały przeprowadzone dla trzech układów iskierników: układ ostrze-ostrze, układ ostrze-płyta i układ do wyładowań powierzchniowych, gdzie jako dielektryk stały zastosowana została płyta szklana.

Schemat ogólny iskiernika umożliwiającego generację wyładowań elektrycznych w układzie ostrze-ostrze w mineralnym oleju elektroizolacyjnym przedstawiono na rysunku 1. Zastosowano elektrody wykonane z miedzi i pokryte galwanicznie niklem o następujących wymiarach: średnica podstawy ostrza 20 mm, długość całkowita ostrza – 35 mm, promień końcówki ostrza – 0,4 mm, kąt krzywizny 32°.



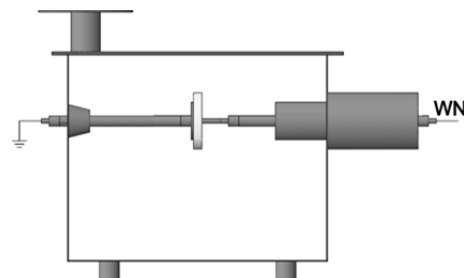
Rys.1. Schemat ogólny iskiernika typu ostrze-ostrze

Na rysunku 2 przedstawiono schemat iskiernika umożliwiającego generację wyładowań elektrycznych w układzie ostrze – płyta w oleju elektroizolacyjnym. Elektrode uziomioną stanowiła płyta o kształcie walca płaskiego o średnicy podstawy 69 mm i grubości 9 mm.



Rys.2. Schemat ogólny iskiernika typu ostrze-płyta

Do generacji wyładowań elektrycznych w układzie powierzchniowym w oleju elektroizolacyjnym wykorzystano układ dwóch metalowych elektrod, między którymi znajdował się dielektryk stały. Schemat ogólny iskiernika w układzie powierzchniowym przedstawiono na rys. 3. Elektrode zasilającą stanowił metalowy walec o średnicy 10 mm. Natomiast elektrodę uziemiającą stanowiła płyta o kształcie walca płaskiego o średnicy podstawy 69 mm i grubości 9 mm. Elektrody iskiernika oddzielone zostały od siebie dielektrykiem stałym, który stanowiła płyta szklana o wymiarach zewnętrznych 90 mm x 90 mm i grubości 10 mm.



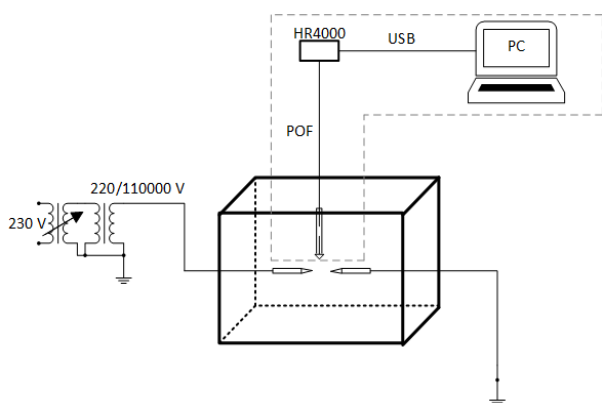
Rys.3. Schemat ogólny iskiernika do wyładowań powierzchniowych

Podczas pomiarów iskierniki umieszczano w uziemionej kadzi pomiarowej o wymiarach (dł. x szer. x wys.): 50 cm x 40 cm x 40 cm, którą wypełniono mineralnym olejem elektroizolacyjnym w ilości ok. 80 l. Dla zachowania powtarzalności pomiarów sygnałów optycznych

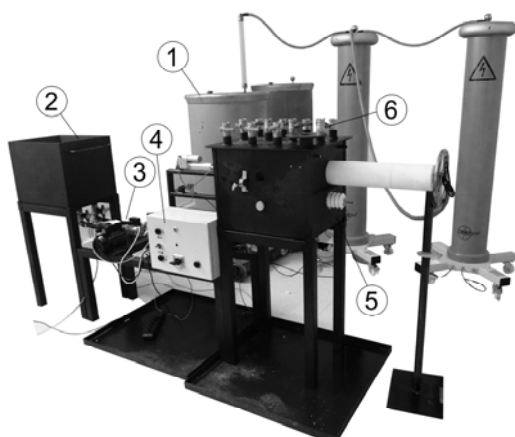
zastosowane układy modelujące umieszczono w specjalnych uchwytach mocujących, które umożliwiały płynną regulację odległości między elektrodami iskierników. Układ pomiarowy posiada wbudowany sterownik elektroniczny, który umożliwia regulację odległości z gradacją co 0,1 mm. Podczas wykonywania pomiarów dla zastosowanych układów generujących wyładowania elektryczne, za wyjątkiem układu do wyładowań powierzchniowych, odległość między elektrodami badanych iskierników była stała i wynosiła 7,0 mm.

Charakterystyka układu pomiarowego

Do rejestracji emisji promieniowania ultrafioletowego, widzialnego i podczerwonego została zastosowana metoda spektrofotometrii optycznej oparta na spektrofotometrze o wysokiej rozdzielczości HR4000 [10-11]. Spektrofotometr zbudowany został w oparciu o matrycę CCD (ang. Charge Coupled Device), która umożliwia detekcję 3648 składowych elementów rejestrowanego widma optycznego. Urządzenie pracuje w zakresie widmowym 200-1100 nm z możliwością zmiany przedziału spektralnego i rozdzielczości optycznej w zależności od dobranej siatki i szczeliny (apertury) wejściowej. Schemat ogólny oraz widok układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 4 i 5.



Rys.4. Schemat ogólny układu pomiarowego



Rys.5. Widok układu pomiarowego: 1) transformator probierczy 110kV, 2) zbiornik pomocniczy na olej, 3) pompy do przemieszczania oleju, 4) układ sterowania do pomp, 5) kadź pomiarowa, 6) zewnętrzne zawory umożliwiające wprowadzanie czujników pomiarowych

Złącze zastosowanego polimerowego światłowodu optycznego (ang. POF – Polymer Optical Fiber) pełniło funkcję głowicy pomiarowej [12-20], która poprzez odpowiednio przygotowany zawór zewnętrzny wprowadzona została do kadzi pomiarowej. Takie

rozwiązanie pozwoliło na odpowiednie usytuowanie głowicy pomiarowej względem badanego zjawiska emisji świetlnej.

Przyjęte warunki generacji wyładowań elektrycznych

W celu umożliwienia porównania i odtworzenia wyników pomiarów i analiz sygnałów optycznych generowanych przez wyładowania elektryczne dla zastosowanych iskierników, wartość napięcia generacji wyładowań ustalono na podstawie procentowego rozkładu napięć wyznaczonych względem napięcia przebicia (U_p) dla każdego z układów. Zmierzone wartości napięcia przebicia dla przyjętych iskierników zestawiono w tabeli 1.

Pomiary przeprowadzono dla trzech stanów technicznych oleju mineralnego:

- olej fabrycznie nowy,
- olej eksploatacyjny,
- olej eksploatacyjny z pęcherzykami powietrza.

Tabela 1. Zmierzone wartości napięcia przebicia dla poszczególnych iskierników

Lp.	Typ iskiernika	Wartość napięcia przebicia U_p
		[kV]
Olej mineralny fabrycznie nowy		
1.	Układ ostrze-ostrze	48,5
2.	Układ ostrze- płyta	47,5
3.	Układ do wyładowań powierzchniowych	49,8
Olej mineralny eksploatacyjny		
4.	Układ ostrze-ostrze	45,6
5.	Układ ostrze- płyta	45,2
6.	Układ do wyładowań powierzchniowych	49,8
Olej mineralny eksploatacyjny z pęcherzykami gazowymi		
7.	Układ ostrze-ostrze	44,8
8.	Układ ostrze- płyta	46,3
9.	Układ do wyładowań powierzchniowych	49,8

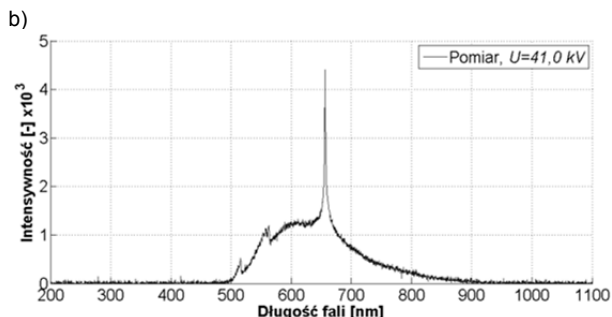
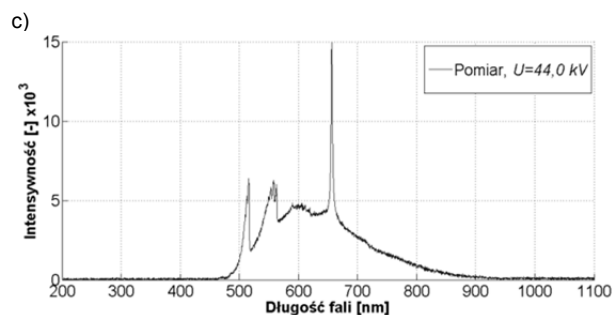
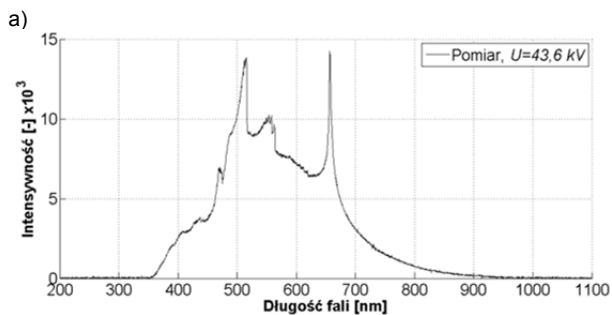
Badania przeprowadzono dla wartości skutecznych napięcia zasilania, które przyjęto w zakresie od $0,65U_p$ do $0,95U_p$ z gradacją co $0,05U_p$ dla każdego typu układu modelującego.

Zastosowany układ pomiarowy został przed każdą serią pomiarową skalibrowany, poprzez wyznaczenie poziomu tła dla badanego zakresu promieniowania optycznego. Umożliwiło to ograniczenie w znacznym stopniu zakłóceń wynikających z przetwarzania sygnału optycznego na postać cyfrową.

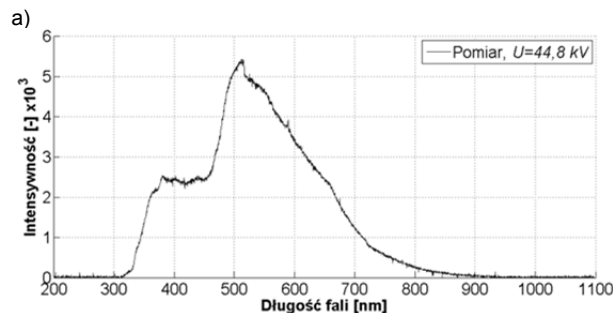
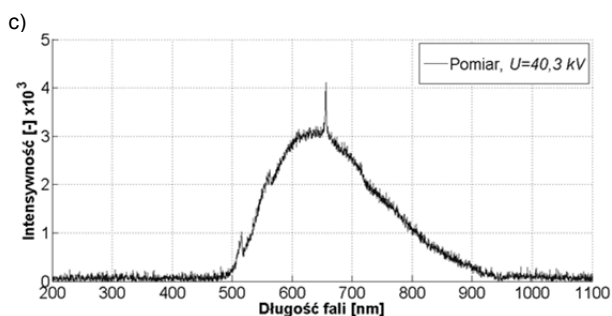
Wykorzystana podczas pomiarów głowica światłowodu została usytuowana w odległości ok. 18 mm od miejsca generacji zjawiska. Odległość ta wyznaczona została na podstawie apertury numerycznej zastosowanego światłowodu, która określa tzw. stożek akceptacji.

Uzyskane charakterystyki widmowe

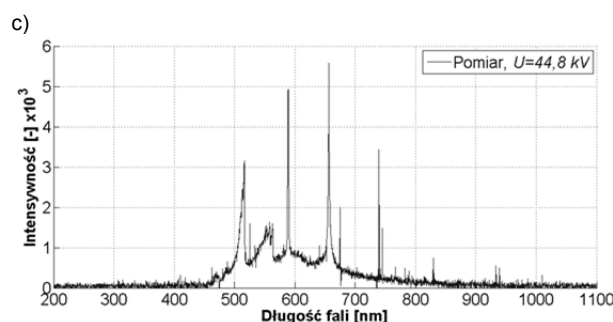
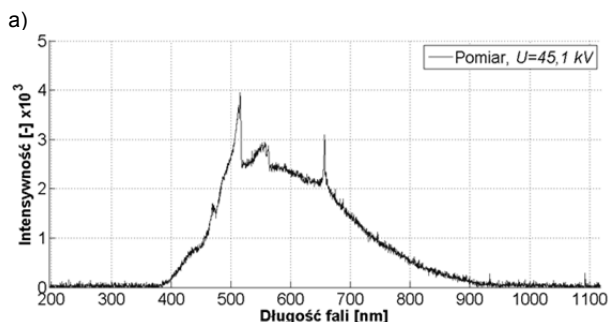
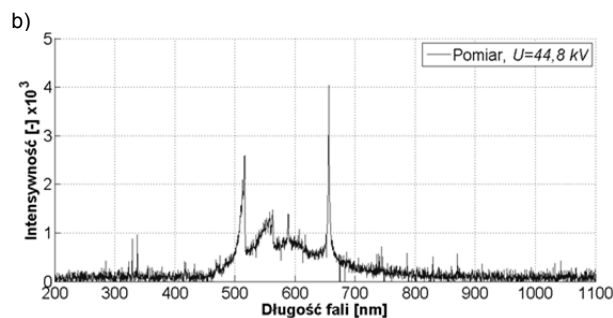
Na rysunkach 6-8 przedstawiono przykładowe rozkłady widmowe promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne generowane w mineralnym oleju izolacyjnym, które zarejestrowano przy napięciu zasilającym równym $0,90U_p$.



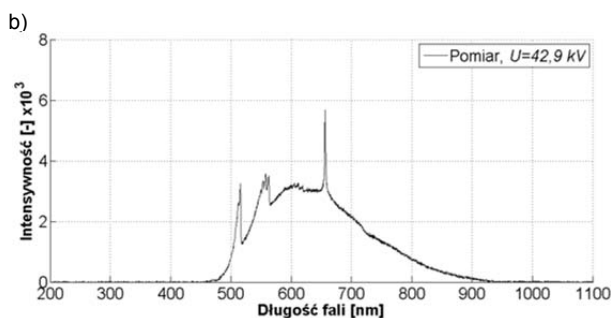
Rys.7. Rozkład widma promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne w układzie ostrze- płyta w oleju mineralnym, dla napięcia zasilania $0,90U_p$: a) olej fabrycznie nowy; b) olej eksploatowany; c) olej z pęcherzykami powietrza



Rys.6. Rozkład widma promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne w układzie ostrze-ostrze w oleju mineralnym, dla napięcia zasilania $0,90U_p$: a) olej fabrycznie nowy; b) olej eksploatowany; c) olej z pęcherzykami powietrza



Rys.8. Rozkład widma promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania elektryczne w układzie powierzchniowym w oleju mineralnym, dla napięcia zasilania $0,90U_p$: a) olej fabrycznie nowy; b) olej eksploatowany; c) olej z pęcherzykami powietrza



Analiza uzyskanych wyników

Przeprowadzone pomiary emitowanego promieniowania optycznego dla przyjętych progów napięcia zasilającego wykazały powtarzalny kształt charakterystyk rozkładów widmowych dla badanych iskierników. Badane formy wyładowań elektrycznych dla różnych warunków generacji wykazały również występowanie niejednorodnych zakresów spektralnych emitowanego promieniowania, które wskazują na indywidualny charakter występowania rozkładów widmowych dla poszczególnych typów układów iskierników.

Charakterystyczne składowe widma optycznego zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Dominujące długości fal widma optycznego

Lp.	Typ iskiernika	Dominujące składowe rozkładu widma optycznego	Zakres spektralny emitowanego promieniowania
		[nm]	[nm]
Olej mineralny fabrycznie nowy			
1.	Układ ostrze-ostrze	516; 562; 656	360 - 910
2.	Układ ostrze-płyta	516; 562; 656	490 - 910
3.	Układ wyładowań powierzchniowych	383; 516	310 - 900
Olej mineralny eksploatowany			
4.	Układ ostrze-ostrze	516; 562; 656	495 - 900
5.	Układ ostrze-płyta	516; 562; 656	480 - 910
6.	Układ wyładowań powierzchniowych	515; 558; 589; 656	460 - 850
Olej mineralny eksploatowany z pęcherzykami powietrza			
7.	Układ ostrze-ostrze	516; 562; 656	490 - 950
8.	Układ ostrze-płyta	516; 562; 656	480 - 910
9.	Układ wyładowań powierzchniowych	515; 558; 589; 656	460 - 850

Największą intensywnością promieniowania charakteryzuje się zakres światła widzialnego (VIS) od 380 nm do 780 nm, oraz niewielka część zakresu tzw. bliskiej podczerwieni (NIR) tj. przedział od 780 nm do 1100 nm. Zaobserwowano bardzo mały udział promieniowania w zakresie ultrafioletu, które występuje jedynie w czystym oleju mineralnym.

Analizując rozkład składowych długości fal badanego zakresu widmowego stwierdzono występowanie trzech charakterystycznych dominujących długości fal o następujących wartościach: 516 nm, 562 nm i 656 nm.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały indywidualny charakter widma promieniowania generowanego w oleju mineralnym dla iskiernika w układzie ostrze-ostrze i w układzie wyładowań powierzchniowych. Umożliwiają one prowadzenie dalszych analiz pod kątem przemian energetycznych oraz wskazują możliwość określenia charakterystycznych deskryptorów umożliwiających rozpoznanie form wyładowań elektrycznych generowanych w mineralnym oleju elektroizolacyjnym na podstawie zarejestrowanych charakterystyk rozkładów widmowych.

Zastosowanie analizy rozkładu widm optycznych emitowanego promieniowania może zostać wykorzystane m.in. do opracowania bilansu energetycznego wyładowania elektrycznego.

Poznanie mechanizmów zjawiska promieniowania optycznego może przyczynić się do rozwoju nowych obszarów badawczych oraz do prac związanych z opracowaniem metody oceny zmian parametrów fizykochemicznych oleju elektroizolacyjnego na podstawie analizy zjawiska emisji sygnałów optycznych generowanych przez wyładowania elektryczne.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Tomasz Boczar, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail t.boczar@po.opole.pl; mgr inż. Michał Kozioł, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: michal.kozioł@op.pl;

LITERATURA

- [1] Frącz P., Wykorzystanie optycznych sygnałów emitowanych przez wyładowania elektryczne w diagnostyce izolatorów, wyd. Politechniki Opolskiej, Opole 2011
- [2] Kozioł M., Boczar T., Optical signals emitted by partial discharges," in *Problems And Progress In Metrology, PAN Series: Conferences No. 20* (2015), 158–161
- [3] Oliveira S. C., Fontana E., Optical detection of partial discharges on insulator strings of high-voltage transmission lines, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 58 (2009), n. 7, 2328–2334
- [4] Muhr M., Schwarz R., Experience with optical partial discharge detection, *Mater. Sci. Pol.*, 27 (2009), n. 4, 1139–1146
- [5] Boczar T., Zmarzły D., Frącz P., Comparative Studies of Partial Discharge Using Acoustic Emission Method and Optical Spectroscopy, *IEEE 11th Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater. 2015*, 740–743
- [6] Kozioł M., Zastosowanie spektrofotometru optycznego do badania widm sygnałów optycznych emitowanych przez wyładowania niepełne w oleju izolacyjnym, *Pozn. Univ. Technol. Acad. Journals Electr. Eng.*, 82 (2015), 159–164
- [7] Shih K. Y., Locke B. R., Optical and electrical diagnostics of the effects of conductivity on liquid phase electrical discharge, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 39 (2011), n. 3, 883–892
- [8] Nagi Ł., Borucki S., Boczar T., Zmarzły D., Analysis of ionizing radiation generated by partial discharges, *Acta Phys. Pol. A*, 125 (2014), 1377–1379
- [9] Rozga P., Mechanism of electrical discharge development in transformer oil in the setup of insulated electrodes, *Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE*, (2010), 325–328
- [10] Devia D. M., Rodriguez-Restrepo L. V., Restrepo-Parra E., Methods Employed in Optical Emission Spectroscopy Analysis: a Review, *Ing. y Cienc.*, 11, no. 21 (2015), 239–267
- [11] Żukowski P., Kozak C., Karwat C., Pomiary temperatury łuku palącego się w szczelinie międzystykowej aparatów elektrycznych za pomocą spektrofotometru światłowodowego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 54 (2008), n. 10, 682–685
- [12] Sporea D., Sporea A., O'Keeffe S., McCarthy D., Lewis E., Optical Fibers and Optical Fiber Sensors Used in Radiation Monitoring, *Sel. Top. Opt. Fiber Technol.*, (2012) 607–652
- [13] Tang J., Zhou J., Zhang X., Liu F., A transformer partial discharge measurement system based on fluorescent fiber, *Energies*, 5 (2012), n. 5, 1490–1502
- [14] Jinachandran S., Xi J., Rajan G., Fibre Optic Acoustic Emission Sensor System for Hydrogen Induced Cold Crack Monitoring in Welding Applications, *IEEE Sensors Appl. Symp.*, (2016), 1–6
- [15] Rosolem J. B., Tomiyama E. K., Dini D. C., Bassan F. R., Penze R. S., Ariovaldo A., Floridia C., Fracaroli J. P. V., A Fiber Optic Powered Sensor Designed for Partial Discharges Monitoring on High Voltage Bushings, *Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S Int.*, (2015), 1–5
- [16] Deng J., Xiao H., Huo W., Luo M., May R., Wang A., Liu Y., Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers, *Opt. Laser Technol.*, 33 (2001), n. 5, 305–311
- [17] Rodriguez-Rodriguez J. H., Martinez-Pinon F., Alvarez-Chavez J. A., Jaramillo-Vigueras D., Polymer optical fiber moisture sensor based on evanescent-wave scattering to measure humidity in oil-paper insulation in electrical apparatus, *Proceedings of IEEE Sensors*, (2008), 1052–1055
- [18] Búa-Núñez I., Azcárraga-Ramos C. G., E. Posada-Román J., Garcia-Souto J. A., Optical Fiber Sensor of Partial Discharges in High Voltage DC Experiments, *23rd Int. Conf. Opt. Fibre Sensors*, (2014), n. 9157, 3–6
- [19] Lamela-Rivera H., Maci-Sanahuja C., a-Garc a-Souto J., Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power transformers, *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, 5 (2002), n.1, 66–72
- [20] Shiyong P., Ping Z., Yinlu R., Changju C., Zihui S., Research on the remoter monitoring and control system of transformer winding temperature based on optical fiber networked sensor, *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2 (2006), 7627–7631