

Paweł FRĄCZ

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI,
ul. Próżkowska 76, 45-758 Opole

Ocena wpływu zmian wartości napięcia na wyniki pomiarów promieniowania optycznego generowanego przez wyładowania niezupełne powierzchniowe na modelu izolatora wsporczoego

Dr inż. Paweł FRĄCZ

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, pracownik Katedry Wysokich Napięć. Autor ponad 40 publikacji głównie z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych w szczególności metody emisji akustycznej i spektrofotometrii optycznej.



e-mail: p.fracz@gmail.com

Streszczenie

Tematyka artykułu dotyczy określenia możliwości i wskazania zakresu zastosowania metody spektrofotometrii optycznej w diagnostyce izolatorów liniowych i stacyjnych. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów promieniowania optycznego emitowanego przez wyładowania niezupełne generowane na modelu izolatora wsporczoego. Podstawowym celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu zmian wartości napięcia zasilającego na intensywność i charakter zarejestrowanych widm promieniowania optycznego.

Słowa kluczowe: metoda spektrofotometrii optycznej, wyładowania niezupełne powierzchniowe, izolator wsporczy.

Voltage value influence estimation on the measurement results for the optical radiation generated by surface partial discharges in stand-off isolator

Abstract

The subject area of the paper concerns the determination of possibility and application scope suggestion for the optical spectrophotometry method in the linear isolators' diagnosis. Measurement results of the optical radiation emitted by surface partial discharges generated in a model of the stand-off isolator, which was placed in the air, are presented in the paper. Recording was done by use of a spectrophotometer that enabled for measurement of optical radiation in the range of 270 to 1600 nm. The main aim of laboratory research works performed was to estimate the influence of the supply voltage value changes in range of 0 to $0,98 U_b$ (breakdown voltage) on the intensity and character of the optical radiation spectrum emitted by surface partial discharges occurring in the ceramic insulating surface of the stand-off isolator. In the scope of research works the analysis of voltage value change influence on the gathered spectra was performed while its accretion and decrease was investigated. Furthermore, the measurements and analysis performed enclose the influence estimation of the time, when the voltage was attached to the high voltage electrode, on the proceeding of the optical phenomena connected with generation of surface partial discharges.

Keywords: optical spectrophotometry method, surface partial discharges, stand-off isolator.

1. Wstęp

W ostatnich latach coraz większe znaczenie w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych zyskują badania nieniszczące, do których można zaliczyć optyczną diagnostykę spektralną, która bazuje na pomiarach i analizie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie długości fal od 10 nm do 30 mm generowanych przez wyładowania elektryczne. Na podstawie doniesień literaturowych można stwierdzić, że przy zachowaniu odpowiedniego reżimu metrologicznego, metoda spektrofotometrii optycznej umożliwia nie tylko precyzyjną detekcję promieniowania generowanego przez wyła-

dowania elektryczne, ale także szeroko rozumianą jego analizę. Konieczność zachowania wysokiej precyzji podczas wykonywania badań diagnostycznych, jak również złożoność procedur obliczeniowych związanych z analizą uzyskiwanych wyników są najczęściej powodem małego zainteresowania tą metodą w zastosowaniu do oceny stopnia zagrożenia układów izolacyjnych przez występujące wyładowania elektryczne. Natomiast przedstawione w literaturze wyniki badań potwierdzają dużą czułość tej metody, ujawniającą się przy zmianach parametrów modelu i warunków prób. Dzięki temu staje się możliwe badanie szeregu zjawisk fizycznych niedostępnych dla klasycznych metod diagnostyki układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych takich jak: elektryczna, chromatografii gazowej i emisji akustycznej [1].

W praktyce eksploatacyjnej istnieje duża liczba układów izolacyjnych budowanych w ten sposób, że dielektryki stałe współpracują z dielektrykami ciekłymi i gazowymi. Płaszczyzna dzieląca współpracujące dielektryki stanowi najczęściej miejsce, w którym wytrzymałość elektryczna całego układu jest najmniejsza. Wzdłuż tej powierzchni mogą powstawać powierzchniowe wyładowania elektryczne niezupełne lub zupełne prowadzące do przebicia izolacji. Powstawanie i rozwój wyładowań niezupełnych powierzchniowych (WNZP) zależy głównie od rodzaju i stanu powierzchni dielektryka stałego, rodzaju napięcia zasilającego układ i przestrzennego rozkładu natężenia pola elektrycznego. Bardzo istotna jest również odporność dielektryka stałego na powstawanie na jego powierzchni WNZP. Własności te warunkowane są przez wewnętrzną strukturę dielektryka stałego, a przede wszystkim obecnością warstwy zabrudzenia na jego powierzchni. Takie dielektryki jak szkło czy porcelana nie biorą, w przeciwieństwie do dielektryków pochodzenia organicznego, czynnego udziału w powstawaniu i rozwoju WNZP [2, 3].

Klasycznym i jednym z najprostszych przykładem układu uwarstwionego równoległe jest izolator wsporczy, w którym natężenie pola elektrycznego po obu stronach powierzchni granicznych w każdym z dielektryków ma taką samą wartość. Przy jednakowych natężeniach pola elektrycznego przeskok iskry elektrycznej następuje w dielektryku o mniejszej wytrzymałości. Schematy zastępcze tego typu układów, równania opisujące fizykę analizowanych zjawisk oraz wykresy przedstawiające zależności napięcia przeskoku od odstępów między elektrodami, zostały szeroko omówione m. in. w pracach [4-6].

Celem przeprowadzonych prac badawczych, których wyniki są prezentowane w niniejszym artykule, było zarejestrowanie i wykonanie analizy promieniowania optycznego generowanego przez WNZP na modelu izolatora wsporczoego. Zakres przeprowadzonych pomiarów obejmował określenie wpływu zmian wartości napięcia zasilającego w zakresie od 0 do $0,98 U_p$ (napięcia przebicia) na intensywność i charakter widm promieniowania optycznego emitowanego przez WNZP. W ramach przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych badań dokonano analizy wpływu na uzyskiwane przebiegi widm zmian wartości napięcia, przy czym badano jego obniżanie i podwyższanie. Ponadto wykonane pomiary, a następnie przeprowadzone analizy obejmowały ocenę wpływu długości czasu przyłożenia napięcia (w zakresie od 0 do 25 min) do elektrody wysokonapięciowej na przebieg zjawisk optycznych.

2. Charakterystyka układu pomiarowego, modelu izolatora wsporczoego i warunków pomiarowych

Do pomiaru promieniowania optycznego emitowanego przez powierzchniowe wyładowania niezupełne (WNZP) generowane

w układzie modelującym izolator wsporczy zastosowano spektrofotometr, którego przetwornik optyczny umieszczono w specjalnie wykonanym uchwycie zamocowanym w statywie. Wykorzystany statyw umożliwiał regulację wysokości, kąta nachylenia i odległości między głowicą pomiarową oraz badanym izolatorem.

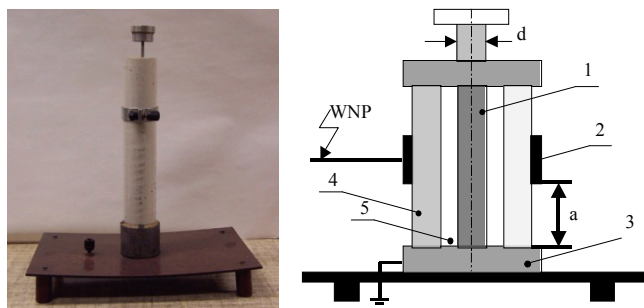
Podczas badań zastosowano spektrometr AVS-USB2000 firmy AVANTES (rys. 1), którego zasadniczym elementem jest wielostopniowa siatka dyfrakcyjna, która umożliwia analizę widm optycznych w zakresie (270-1700) nm z rozdzielczością około 0,5 nm. Rejestrowany sygnał jest doprowadzany do siatki za pomocą światłowodu. Po rozszczeniu promieniowanie pada na matrycę CCD (Sony ILX511). Czas integracji można zmieniać w zakresie od 3 ms do 60 sekund. Pomiar w poszczególnym elemencie matrycy CCD (2048 elementów o rozmiarach 12,5 x 200 mikrometrów) polega na zliczaniu fotonów w jednostce czasu. Jedno zliczenie odpowiada aktywacji przez 86 fotonów co jest równoważne czułości $2,9 \cdot 10^{-17}$ J/impuls. Względna czułość zależy od długości analizowanej fali. Wartość skuteczna prądu ciemnego wynosi od 2,5 do 4 zliczeń. Szczegółową charakterystykę zastosowanego spektrofotometru przedstawiono m.in. w pracy [1].

Niepewność standardowa pomiaru intensywności (liczby zliczeń) określona metodą typu A wynosi od 10 do 100 w zależności od długości fali, konfiguracji układu, wartości napięcia oraz czasu pomiaru.



Rys. 1. Spektrofotometr AVS-USB2000 firmy AVANTES [7]
Fig. 1. AVS-USB2000 spectrophotometer by the firm AVANTES [7]

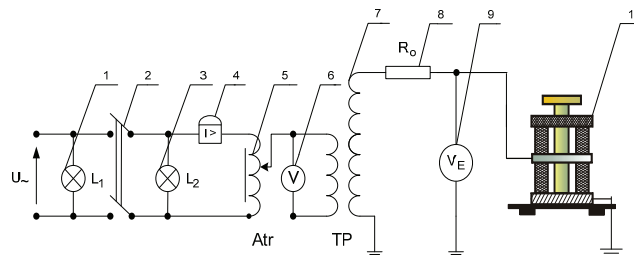
Do generacji WNZP użyto modelu izolatora (rys. 2), który wykonano w postaci porcelanowej tulei wypełnionej olejem transformatorowym.



Rys. 2. Wygląd rzeczywisty i schemat ideowy układu modelującego izolator wsporczy, gdzie: 1- metalowy wkład, 2 - ruchoma obejmka, 3 - uziemione okucie, 4- izolacja ceramiczna, 5- olej transformatorowy [3]
Fig. 2. The view and idea diagram of the system modeling the stand-off isolator, where: 1 - metal insert, 2- movable grip, 3- grounded ferrule, 4 - porcelain insulation, 5- transformer oil

Badany model izolatora był zasilany z układu probierczego umożliwiającego płynną regulację podawanego napięcia w zakresie od 0 do 60 kV. Zastosowany układ probierczy składał się z pulpitu sterowniczego zawierającego autotransformator (5), zabezpieczenie nadprądowe (4) oraz woltmierz cyfrowy mierzący wartość napięcia po stronie niskiego napięcia (6). Regulowane za pomocą autotransformatora napięcie było podawane na jednofazowy transformator probierczy typu TP60 o przekładni znamionowej 230/60 000 V/V (7) za pomocą, którego poprzez rezystor wodny (8), zasilano układy modelujące izolator wsporczy i przepustowy (10). Wielkość napięcia zasilającego po stronie wysokie-

go napięcia mierzono woltmierzem elektrostatycznym (9), który dołączono za rezystorem ograniczającym wartość prądu zwarciowego (8). Schemat wykorzystanego wysokonapięciowego układu probierczego przedstawiono na rys. 3 [8].



Rys. 3. Schemat układu zasilającego, gdzie: 1, 3-lampki kontrolne, 2-wyłącznik napięcia, 4-zabezpieczenie nadprądowe, 5-autotransformator, 6-woltmierz cyfrowy, 7-transformator probierczy, 8- rezystor ochronny, 9-woltmierz elektrostatyczny, 10-układ modelujący izolator wsporczy i przepustowy [8]
Fig. 3. Schematic of the power setup, where: 1, 3- control lamps, 2- switch, 4- over-current relay, 5- autotransformer 6- digital voltmeter, 7- test transformer, 8- protective resistor, 9- electrostatic voltmeter, 10- system modeling the stand-off isolator

Podczas każdej serii pomiarowej była zachowana stała odległość równa 3 cm między głowicą pomiarową spektrofotometru i miejscem generacji WNZP. Pomiaru zostały wykonane w zaciemnionym pomieszczeniu bez dostępu jakichkolwiek dodatkowych źródeł promieniowania świetlnego.

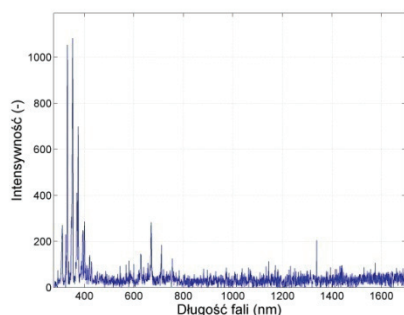
Aby otrzymane wyniki można było poddać analizie porównawczej pomiary generowanego przez WNZP promieniowania optycznego wykonano przy tej samej odległości między elektrodami (2 i 3) równej 9 cm oraz odległości między spektrofotometrem i miejscem generacji WNZP.

3. Widma promieniowania optycznego emitowane przez WNZP na modelu izolatora wsporczego

Na rys. 4 i 5 przedstawiono widma promieniowania optycznego generowanego przez WNZP na modelu badanego izolatora wsporczego, odpowiednio dla całego rejestrowanego zakresu długości fal $\lambda = (270 - 1700)$ nm (rys. 4) i dla przedziału (270-450) nm obejmującego długości dominujące o największej intensywności (rys. 5). Widma wyznaczono dla promieniowania optycznego emitowanego przy podwyższaniu napięcia zasilającego, dla względnej wartości napięcia równej $0,98 U_p$. Na rys. 6 zilustrowano zmiany intensywności zarejestrowanego promieniowania przy wzroście napięcia zasilającego w zakresie od $0,8 U_p$ (37 kV) do $0,98 U_p$ (45 kV). Dla niższych wartości napięcia rejestrowane promieniowanie optyczne miało stosunkowo mniejszą i pomijalną intensywność dlatego nie zostało uwzględnione na charakterystyce. Rys. 7 przedstawia przebieg funkcji aproksymującej wyznaczony dla widma promieniowania optycznego w zakresie od 270 do 990 nm, dla której współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,9$. Dodatkowo na wykresie zaznaczono wartości liczbowe dominujących długości fali promieniowania.

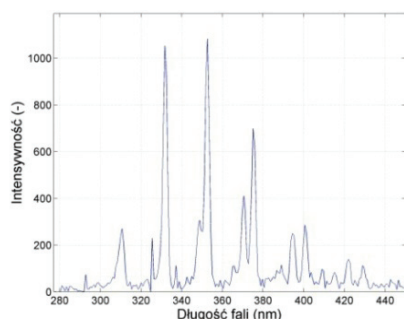
Rezultaty otrzymane przy obniżaniu napięcia zasilającego zilustrowano w analogiczny sposób jak przy jego podwyższaniu i przedstawiono na rys. 8-11. W celach porównawczych na rys. 12 zaprezentowano widma promieniowania optycznego uzyskane przy obniżaniu i podwyższaniu napięcia zasilającego wyznaczone dla względnej wartości napięcia równej $0,98 U_p$. Natomiast na rys. 13 przedstawiono zmianę intensywności promieniowania optycznego zarejestrowanego dla dominującej w widmie długości fali $\lambda = 352$ nm przy zmianach napięcia zasilającego w zakresie od $0,8$ do $0,98 U_p$, porównawczo przy jego obniżaniu i podwyższaniu.

Rys. 14 przedstawia zmiany intensywności promieniowania optycznego generowanego przez WNZP w funkcji czasu (25 min) przy stałej wartości napięcia zasilającego równej $0,98 U_p$.



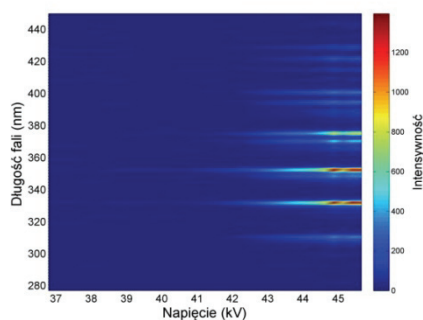
Rys. 4. Widmo promieniowania optycznego generowanego przez WNZP przy podwyższeniu wartości napięcia zasilającego model izolatora wsporczo, dla wartości napięcia równej $U = 0,98 U_p$ i dla długości fali w zakresie $\lambda = 270 - 1700$ nm

Fig. 4. Spectrum of optical radiation generated by PDS in the model of stand-off isolator at accreted voltage, at the voltage $U = 0,98 U_b$ and the wavelength interval $\lambda = 270 - 1700$ nm



Rys. 5. Widmo promieniowania optycznego generowanego przez WNZP przy podwyższeniu wartości napięcia zasilającego model izolatora przepustowego, dla wartości napięcia równej $U = 0,98 U_p$ i dla długości fali w zakresie $\lambda = 270 - 450$ nm

Fig. 5. Spectrum of optical radiation generated by SPDs in the model of stand-off isolator at accreted voltage, at the voltage $U = 0,98 U_b$ and the wavelength interval $\lambda = 270 - 450$ nm



Rys. 6. Zmiana intensywności promieniowania optycznego generowanego przez WNZP przy podwyższeniu napięcia zasilającego model izolatora wsporczo

Fig. 6. Change of the intensity of optical radiation generated by the SPDs in a model of stand-off isolator at accreted voltage

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych związanych z rejestracją promieniowania optycznego emitowanego przez WNZP generowane na modelu izolatora wsporczo i analiz uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

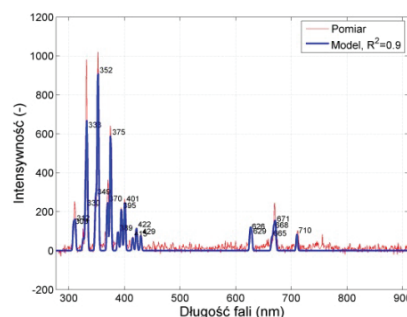
- charakter przebiegów wyznaczonych widm promieniowania optycznego nie zależy od wartości napięcia generacji WNZP. Dotyczy to zakresu napięcia od zapłonu wyładowań (ok. $0,5 U_p$) do wartości równej $0,98 U_p$. Dla mniejszych wartości napięcia (poniżej $0,8 U_p$) intensywność promieniowania emitowanego przez WNZP jest znacznie mniejsza i cechuje ją mała stabilność, a badane zjawisko charakteryzuje się silną stochastycznością.

- Badając wpływ obniżania i podważania wartości napięcia zasilającego wykazano brak wpływu na charakter uzyskanych zależności widmowych. Dotyczy to zarówno charakteru uzyskanych przebiegów widm promieniowania optycznego, jak również długości fali o największej intensywności.
- Wyznaczone widma mają dwa widoczne ekstrema intensywności odpowiednio w przedziałach: (300-430) nm i (500-720) nm, przy czym intensywność promieniowania w zakresie ultrafioletu (w szczególności UV-A 315 nm - 400 nm) jest znacznie większa niż w zakresie widzialnym 380 nm - 780 nm).
- W obliczonych widmach promieniowania optycznego występują trzy dominujące długości fali: 333 nm, 352 nm i 375 nm, których intensywność jest zdecydowanie największa. Intensywność pozostałych fal w dwóch wyróżnionych przedziałach dominujących jest ponad dwukrotnie mniejsza.
- Charakter obliczonych widm promieniowania optycznego nie zmienia się w czasie dla zadanej stałej wartości napięcia generacji WNZP.
- Widma intensywności promieniowania optycznego zamodelowano przy użyciu szeregu funkcji Gaussa.

$$I(f) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-\left(\frac{f-f_i}{d}\right)^2} \quad (1)$$

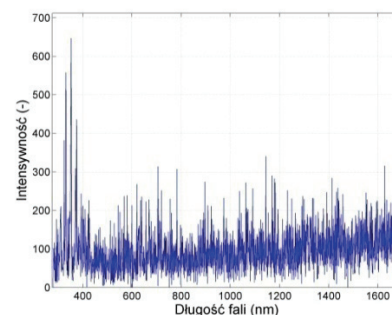
gdzie A_i jest amplitudą składowego prążka o długości f_i/d , wartość $d=1,8$ jest przyjętą szerokością pojedynczego prążka, f jest długością fali.

Wartość średnia poszczególnych składowych określa długość składowej fali promieniowania. Zastosowane modele cechuje duży stopień zgodności, wartość współczynnika determinacji R^2 powyżej 0,85.



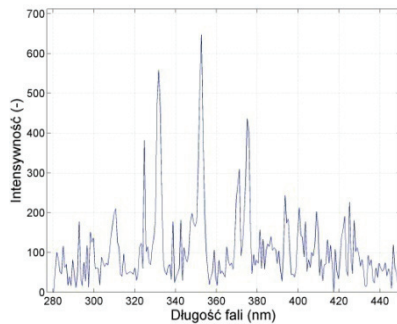
Rys. 7. Widmo promieniowania optycznego generowanego przez WNZP przy podwyższeniu wartości napięcia zasilającego model izolatora wsporczo, dla wartości napięcia równej $U = 0,98 U_p$, uzyskane z pomiarów i zamodelowane

Fig. 7. Spectrum of optical radiation generated by PDS at accreted voltage in the model of stand-off isolator, at the voltage $U = 0,98 U_b$, obtained from measurements and the model



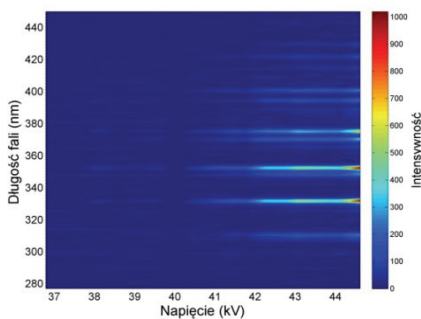
Rys. 8. Widmo promieniowania optycznego generowanego przez WNZP przy obniżaniu wartości napięcia zasilającego model izolatora wsporczo, dla wartości napięcia równej $0,98 U_p$ i dla długości fali w zakresie $\lambda = 270 - 1700$ nm

Fig. 8. Change of the intensity of optical radiation generated by the SPDs in a model of stand-off isolator at decreased voltage and the wavelength interval $\lambda = 270 - 1700$ nm



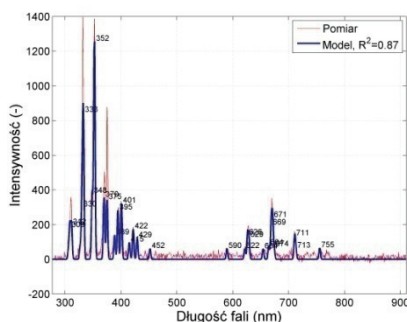
Rys. 9. Widmo promieniowania optycznego generowanego przez WNZZ przy obniżeniu wartości napięcia zasilającego model izolatora wsporczonego, dla wartości napięcia równej $0,98 U_b$ i dla długości fali w zakresie $\lambda = 270 - 450$ nm

Fig. 9. Change of the intensity of optical radiation generated by the SPDs in a model of stand-off isolator at decreased voltage, at the voltage $U = 0,98 U_b$ and the wavelength interval $\lambda = 270 - 450$ nm



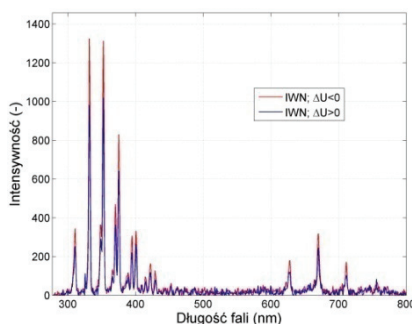
Rys. 10. Zmiana intensywności promieniowania optycznego generowanego przez WNZZ przy obniżeniu napięcia zasilającego model izolatora wsporczonego

Fig. 10. Change of the intensity of optical radiation generated by the SPDs in the model of stand-off isolator at decreased voltage



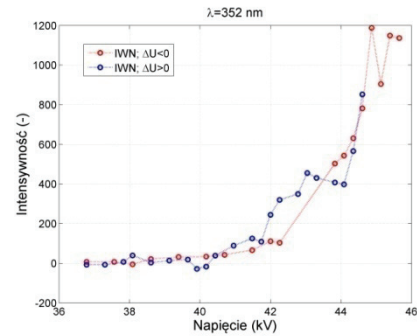
Rys. 11. Widmo promieniowania optycznego generowanego przez WNZZ przy obniżeniu wartości napięcia zasilającego model izolatora wsporczonego, dla wartości napięcia równej $U = 0,98 U_b$, uzyskane z pomiarów i zamodelowane

Fig. 11. Spectrum of optical radiation generated by SPDs at decreased voltage in the model of stand-off isolator, at the voltage $U = 0,98 U_b$, obtained from measurements and the model



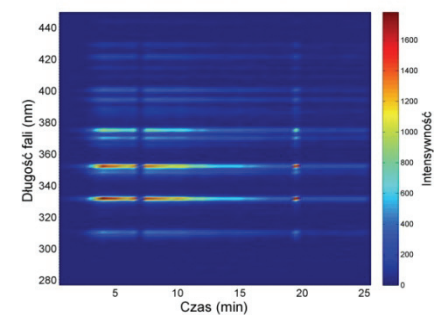
Rys. 12. Porównanie widm promieniowania optycznego generowanego przez WNZZ przy podwyższeniu i obniżeniu napięcia zasilającego model izolatora wsporczonego, dla napięcia $0,98 U_b$

Fig. 12. Comparison of optical radiation spectra generated by SPDs at decreased and accreted voltage in the model of stand-off isolator, at the voltage $U = 0,98 U_b$



Rys. 13. Zmiana intensywności promieniowania optycznego generowanego przez WNZZ przy podwyższeniu i obniżeniu napięcia zasilającego model izolatora wsporczonego, dla dominującej długości fali $\lambda = 352$ nm

Fig. 13. Change of the intensity of optical radiation generated by the SPDs in the model of stand-off isolator for accreted and decreased voltage, for dominant wavelength $\lambda = 352$ nm



Rys. 14. Zmiana intensywności promieniowania optycznego generowanego przez WNZZ w funkcji czasu przy stałej wartości napięcia zasilającego model izolatora wsporczonego przy $U = 0,98 U_b = \text{const}$

Fig. 14. Change of the intensity of optical radiation generated by the SPDs in a model of stand-off isolator as a function of time at the voltage $U = 0,98 U_b = \text{const}$

5. Literatura

- [1] Boczar T., Zmarzły D.: Optical Spectra of Surface Discharges in Oil. IEEE Trans. on DEIS, Vol. 13, No 3, 2006, pp. 632-639.
- [2] Boczar T. Frącz P.: Emisja akustyczna wyładowań niepełnych generowanych na izolatorach przepustowych i wsporczych. Zeszyt Specjalny Przeglądu Elektrotechnicznego, 2002, str. 22-26.
- [3] Boczar T., Borucki S., Cichoń A. Lorenc M.: Time-Frequency Analysis of the AE Signals Generated by PDs on Bushing and Stand-off Isolators. Archives of Acoustics, Quarterly Vol. 31, No 4, Warszawa 2006, pp. 325-333.
- [4] Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1996.
- [5] Szczepański Z.: WNZ w izolacji urządzeń elektrycznych. Warszawa, WNT 1973.
- [6] Wodziński J.: Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów. Warszawa, WNT 1997.
- [7] <http://wefcol.vub.ac.be/> (Odsłona 11.03.2011)
- [8] Boczar T.: Analiza zakłóceń w pomiarach akustycznych wyładowań niepełnych. Studia i Monografie, Wyd. Pol. Op., z. 259, Opole, 2010.

otrzymano / received: 15.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany