

**Paweł FRĄCZ**

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

## Analiza możliwości wykorzystania kamery do pomiaru promieniowania ultrafioletowego emitowanego przez wyładowania niezupełne generowane na modelu izolatora przepustowego

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 w diagnostyce izolatorów liniowych i stacyjnych kamery rejestrującej promieniowanie ultrafioletowe. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów promieniowania ultrafioletowego emitowanego przez wyładowania niezupełne powierzchniowe generowane na modelu izolatora przepustowego umieszczonego w powietrzu. W ramach przeprowadzonych badań dokonano analizy wpływu szeregu czynników metrologicznych na uzyskiwane wyniki.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne powierzchniowe, promieniowanie ultrafioletowe, izolator przepustowy.

### Analysis of camera application possibility for measurement of ultraviolet radiation emitted by partial discharges generated on a bushing isolator model

#### Abstract

The scope of this paper considers possibility determination and application area indication of a camera for ultraviolet radiation recording in diagnosis of linear isolators. Measurement results of ultraviolet radiation emitted by surface partial discharges (SPDs) generated on a bushing isolator mounted in the air are presented in the paper. Recording was performed by use of a professional UVollé camera by the firm OFIL which enables for ultraviolet radiation measurement in the range of 50 nm to 280 nm. The main aim of works, performed under laboratory conditions, was to estimate the influence of supply voltage value changes in the range of 0 to 0.98  $U_p$  (breakdown voltage) on the counting quantity of partial discharges occurring on the surface of the ceramic bushing isolator. Moreover, the measurements and analyses performed, enclosed the influence estimation of the duration time of voltage applied to high tension electrodes, on the optical phenomena progress connected with SPDs generation. In the scope of works executed also the influence analyses of the distance between electrodes as well parameters of camera applied (sensitivity, amplification and size of the counting window) on the achieved results were investigated. Additionally, a comparative analysis of measurements results achieved for two diameters of the metal electrode (refill) for bushing isolator model was performed.

**Keywords:** surface partial discharges, ultraviolet radiation, bushing isolator.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych problemów związanych są zapewnieniem prawidłowej eksploatacji linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć jest możliwość występowania wyładowań elektrycznych, zarówno o charakterze zupełnym jak również niezupełnym, na osprzęcie sieciowym, a w szczególności na izolatorach przepustowych i wsporczych. Ich generacja może powodować nie tylko zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej i przeskoki pojedynczych iskier ale również pęknięcia powodujące trwałe uszkodze-

nia izolacji i w konsekwencji przebicie izolatorów. Aby odpowiednio wcześniej przewidywać możliwość wystąpienia tego typu uszkodzeń można stosować kamery rejestrujące promieniowanie ultrafioletowe (UV) w zakresie od 10 nm do 400 nm, które generowane jest zarówno przez wyładowania niezupełne o charakterze ulotowym (koronowym), jak również przez wyładowania niezupełne występujące bezpośrednio na powierzchni izolatorów.

W artykule przedstawiono wyniki rejestracji promieniowania w UV wykonane za pomocą specjalistycznej kamery UVollé firmy OFIL generowanego przez wyładowania niezupełne powierzchniowe (WNZP) występujące na modelu izolatora przepustowego. Pomiary przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych badając wpływ wartości napięcia zasilającego wykonany model izolatora przepustowego. Wykonano także analizy zmierzające do określenia wpływu czasu generacji WNZP oraz parametrów technicznych zamodelowanego izolatora na uzyskiwane wyniki. Ponadto dokonano oceny wpływu parametrów wykorzystanej podczas pomiarów kamery UV na liczbę zliczeń WNZP.

## 2. Charakterystyka zastosowanej kamery UV, układu modelującego izolator przepustowy i warunków pomiarowych

Podczas pomiarów wykorzystano profesjonalną kamerę UVollé firmy OFIL (rys. 1) przeznaczoną do monitoringu sieci elektroenergetycznych zarówno średnich jak również wysokich i najwyższych napięć. W kamerze wykorzystano detektory rejestrujące równoległe obrazy WNZ w dwóch pasmach: UV (w zakresie od 250 nm do 280 nm) i widzialnym. Zasada pomiaru opiera się na zliczaniu liczby WNZ poprzez detektor UV oraz nałożeniu uzyskanego w ten sposób obrazu proporcjonalnego do ich ilości na zdjęcie widzialne badanego obiektu elektroenergetycznego. Po nałożeniu jednego obrazu na drugi otrzymywany jest precyzyjny obraz mocy WNZ, a pozostałą część stanowi zdjęcie w świetle widzialnym. Zastosowane w kamerze obiektywy i filtr optyczny zostały zoptymalizowane pod kątem zobrazowania efektu WNZ wraz z otaczającą ich sceną w świetle widzialnym. W ten sposób możliwa jest detekcja, punktowa lokalizacja miejsc występowania oraz pomiar intensywności WNZ. Dodatkowo kamera UVollé jest wyposażona w algorytm redukcji szumów, za pomocą którego eliminowane są sporadycznie występujące najczęściej pojedyncze sygnały UV [1].



Rys. 1. Kamera UVollé firmy OFIL [2]

Fig. 1. UVollé camera by the firm OFIL [2]

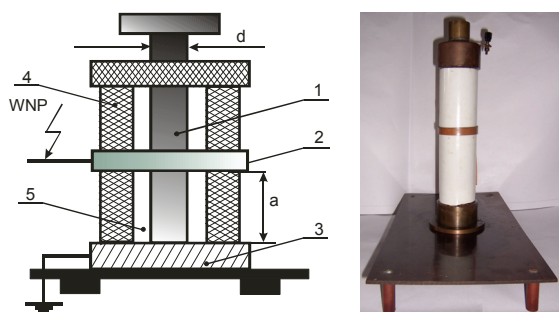
Niepewność standardowa typu A pomiaru liczby zliczeń wynosi od 1000 do 3000 zliczeń w zależności od rodzaju izolatora, napięcia oraz odległości między elektrodami. Przykładowy rozkład gęstości prawdopodobieństwa oraz wartość odchylenia standardowego przedstawiono w dalszej części artykułu, na rys. 9.

W celu zamodelowania WNZP na izolatorze przepustowym zastosowano układ modelowy, którego schemat poglądowy i wygląd rzeczywisty przedstawiono na rys. 2. Izolator przepustowy jest klasycznym przykładem układu uwarstwionego ukośnie. Rozkład napięć w takim układzie izolacyjnym zależy przede wszystkim od pojemności powierzchniowej i pojemności dielektryka umieszczonego między elektrodami [3-6]. Układ modelujący izolator przepustowy został zasilony ze standardowego układu probierczego wysokiego napięcia, umożliwiającego płynną regulację napięcia w zakresie od 0 do 60 kV. Zakres przeprowadzonych pomiarów promieniowania UV generowanego przez WNZP na modelu izolatora przepustowego obejmował następujące przypadki:

- A) ocena wpływu na uzyskiwane wyniki zamian następujących czynników:
- odległości między aluminiową obejmą (2), do której podłączono wysokie napięcie i uziemionym okuciem (3) wypełnionej olejem porcelanowej rury izolacyjnej (4) w zakresie od 1 cm do 12 cm, z gradacją wykonanych pomiarów co 1 cm, przy stałej średnicy elektrody (1) równej 11,9 mm,
  - wielkości średnicy (d) aluminiowej elektrody (1) w zakresie od 4,9 mm do 11,9 mm, przy stałej odległości między elektrodami (a),
  - wartości napięcia zasilającego przyłożonego do ruchomej elektrody (2) dla danej odległości między elektrodami (a)
  - długości czasu przyłożenia napięcia dla danej odległości między elektrodami (a)

- B) ocena wpływ na uzyskiwane wyniki zamian parametrów technicznych kamery UV tj.: czułości, wielkości okna zliczającego i powiększenia cyfrowego.

Aby otrzymane wyniki (badania dotyczące zakresu pkt. A) można było poddać analizie porównawczej pomiary generowanego przez WNZP promieniowania UV wykonano przy tych samych parametrach kamery tj.: względnej czułości równej 90, maksymalnej wielkości obszaru okna zliczającego, odległości kamery od źródła wyładowań, a także wielkości cyfrowego powiększenia (wzmocnienia) rejestrowanych zdarzeń.



Rys. 2. Schemat ideowy i wygląd rzeczywisty układu modelującego izolator przepustowy, gdzie: 1- metalowa elektroda, 2-ruchoma obejma,

3 – uziemione okucie, 4- izolacja ceramiczna, 5- olej transformatorowy [7]  
Fig. 2. Idea diagram and view of the system modeling the bushing isolator, where: 1 – metal insert, 2- movable grip, 3- grounded ferrule, 4 – porcelain insulation, 5- transformer oil [7]

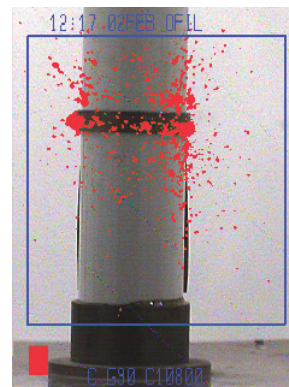
### 3. Wyniki przeprowadzonych badań w warunkach laboratoryjnych

Ze względu na ograniczoną objętość w artykule zaprezentowano jedynie wybrane wyniki natomiast w podsumowaniu przedstawiono wnioski dotyczące całego zakresu przeprowadzonych badań laboratoryjnych.

Na rys. 3 przedstawiono obraz WNZP generowanych na modelu badanego izolatora przepustowego, który został zarejestrowany kamerą UV dla wartości napięcia zasilającego równej  $0,9 U_p$  (napięcia przebicia), czułości względnej 90 odległości między elektrodami (2 i 3) równej 9 cm i metalowego wkładu o średnicy 9,9 mm.

Na rys. 4 przedstawiono zależność liczby zliczeń WNZP wykreśloną w celach porównawczych dla czterech wybranych odległości między elektrodami tj.: 1, 4, 8 i 12 cm, przy czym analogiczny charakter zależności uzyskano dla pozostałych badanych odległości.

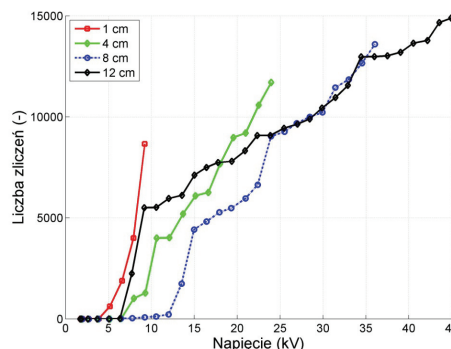
Rys. 5 ilustruje zależność liczby zliczeń WNZP od zmian napięcia zasilającego w zakresie od 0 do 16 kV ( $0,9 U_p$ ), które uzyskano z pomiarów i dla trzech zaproponowanych modeli. Pomiary wykonano dla stałej odległości między elektrodami (2 i 3) równej 2 cm i średnicy metalowej elektrody (1) 9,9 mm. Natomiast w tabeli 1 przedstawiono zestawienie porównawcze wartości współczynników determinacji  $R^2$  wyznaczone dla trzech zaproponowanych modeli obliczone dla dwunastu badanych odległości.



Rys. 3. WNZP generowane na modelu izolatora przepustowego, zarejestrowane przy napięciu równym  $0,9 U_p$ , odległości między elektrodami - 9 cm, względnej czułości - 90, dla wkładu o średnicy 9,9 mm

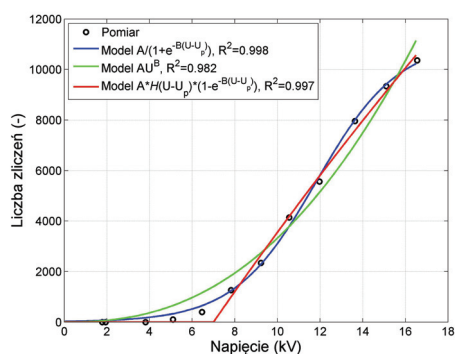
Fig. 3. SPDs generated on the model of bushing isolator by voltage equal to  $0,9 U_p$ , distance between electrodes - 9 cm, and relative sensitivity - 90, for the refill of diameter 9.9 mm

Na rys. 6 przedstawiono zależność liczby zliczeń WNZP wyznaczonej dla analizowanych odległości między elektrodami uzyskane z pomiarów i zamodelowane dla jednej wartości napięcia odniesienia równej 30 kV. Natomiast w tabeli 2 zestawiono wartości współczynnika determinacji i zbieżności obliczone dla zaproponowanego modelu dla wybranych wartości napięcia zasilającego badany izolator.



Rys. 4. Zmiana liczby zliczeń WNZP w funkcji wartości napięcia zasilającego dla wybranych odległości między elektrodami dla modelu izolatora przepustowego

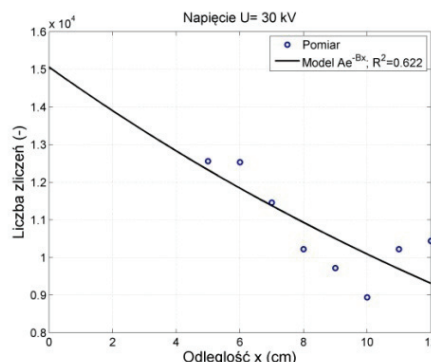
Fig. 4. Variation of the SPDs counting quantity for chosen distances between electrodes for the bushing isolator model



Rys. 5. Liczby zliczeń WNZZ w funkcji wartości napięcia zasilającego, generowane dla modelu izolatora przepustowego, dla odległości 2 cm między elektrodami i średnicy metalowej elektrody 9,9 mm  
 Fig. 5. The SPD counting quantity in function of the supply voltage, generated at constant distance between electrodes equal to 2 cm, and for the refill of diameter equal to 9.9 mm for the bushing isolator model

Tab. 1. Wartości współczynników determinacji  $R^2$  oraz wyznaczonych parametrów dla trzech modeli opisujących zależność liczby zliczeń WNZZ w funkcji zmian napięcia zasilającego, zarejestrowane dla badanych odległości między elektrodami modelu izolatora przepustowego,  $H(U)$  – funkcja Heaviside'a  
 Tab. 1. Determination coefficient values  $R^2$  and parameters determined for three models describing dependency of the SPDs counting quantity on the supply voltage changes, recorded by variation of the distance between electrodes for the bushing isolator model,  $H(U)$  – step function

MODEL: $A/(1+\exp(B(U-U_p)))$				
Odległość x, cm	$A (\times 10^4)$	$B$	$U_p$	$R^2$
1	2,65	0,739	10,2	0,999
2	1,11	0,519	11,8	0,998
3	1,06	0,469	10,1	0,966
4	1,20	0,274	15,4	0,978
5	1,09	0,400	11,7	0,980
6	1,20	0,312	13,5	0,981
7	1,15	0,217	14,6	0,939
8	1,29	0,213	21,1	0,976
9	1,39	0,133	22,4	0,971
10	1,28	0,141	19,8	0,952
11	1,26	0,164	19,2	0,943
12	1,40	0,134	18,0	0,939
MODEL: $AU^B$				
Odległość x, cm	$A$	$B$	$R^2$	
1	0,231	4,74	0,999	
2	12,8	2,41	0,982	
3	159	1,47	0,947	
4	47,3	1,74	0,978	
5	333	1,11	0,934	
6	316	1,11	0,937	
7	319	1,06	0,939	
8	38,8	1,65	0,965	
9	181	1,17	0,982	
10	322	0,99	0,963	
11	299	1,02	0,941	
12	584	0,85	0,959	
MODEL: $AH(U-U_p)(1-e^{-B(U-U_p)})$				
Odległość x, cm	$A (\times 10^4)$	$B (\times 10^{-2})$	$U_p$	$R^2$
1	22,0	1,18	6,02	0,978
2	6,10	2,00	7,00	0,997
3	1,38	1,19	5,78	0,981
4	6,30	1,14	6,41	0,991
5	1,29	1,08	6,13	0,987
6	1,39	9,82	7,01	0,992
7	1,46	6,19	5,64	0,968
8	2,32	3,25	10,5	0,990
9	3,74	1,21	4,77	0,989
10	1,75	3,47	5,40	0,982
11	1,53	5,11	7,59	0,974
12	1,79	3,76	3,48	0,975

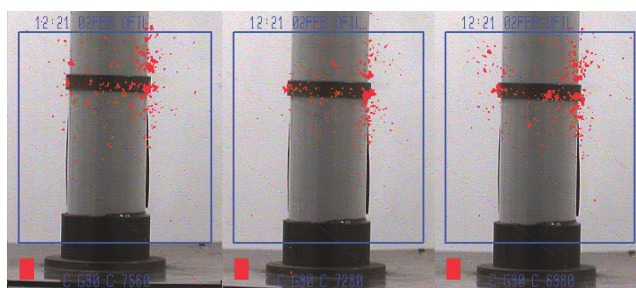


Rys. 6. Liczby zliczeń WNZZ generowanych na modelu izolatora przepustowego dla analizowanych odległości między elektrodami, wyznaczone dla tej samej wartości napięcia równej 30 kV  
 Fig. 6. The SPDs counting quantity generated on the model of bushing isolator for analyzed distances between electrodes, calculated for the same values of voltage equal to 30 kV

Tab. 2. Wartości współczynników determinacji  $R^2$  oraz wyznaczonych parametrów dla modelu opisującego zależność liczby zliczeń WNZZ w funkcji odległości między elektrodami dla wybranych wartości napięcia zasilającego  
 Tab. 2. Determination coefficient values  $R^2$  and parameters determined for the model describing dependency of the SPDs counting quantity on the distance between electrodes for some supply voltage values

MODEL: $Ae^{-Bx}$			
Wartość napięcia, kV	$A (\times 10^4)$	$B$	$R^2$
5	0,11	0,613	0,706
10	0,79	0,113	0,395
15	0,91	0,042	0,300
20	1,20	0,053	0,592
25	1,41	0,046	0,673
30	1,51	0,040	0,622
35	1,43	0,017	0,242

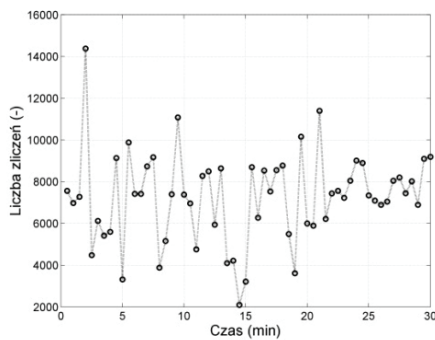
Na rys. 7 przedstawiono fotografie uzyskane za pomocą kamery UV ilustrujące miejsca i intensywność generacji WNZZ na badanym izolatorze dla trzech chwil czasowych wybranych z 30 minutowej rejestracji.



Rys. 7. WNZZ dla trzech wybranych chwil czasowych zarejestrowane przy stałym napięciu, odległości między elektrodami równej 9 cm, dla wkładu o średnicy 9,9 mm, dla modelu izolatora przepustowego  
 Fig. 7. SPDs for three chosen instants recorded by constant voltage, distance between electrodes, for the refill of diameter equal to 9.9 mm for the bushing isolator model

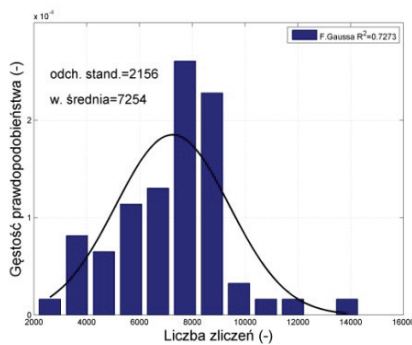
Natomiast na rys. 8 i 9 przedstawiono kolejno wykres zależności liczby zliczanych WNZZ od czasu przyłożenia napięcia (rys. 8) i odpowiadający mu rozkład gęstości prawdopodobieństwa (rys. 9). Dodatkowo obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe i wyznaczono przebieg dopasowanej krzywej rozkładu normalnego F. Gaussa oraz wyznaczono odpowiadającą jej wartość współczynnika determinacji. Rejestracje wykonano przy stałej wartości napięcia zasilającego równej  $0,9 U_p$ , odległości między elektrodami - 9 cm i dla wkładu o średnicy - 9,9 mm.





Rys. 8. Liczby zliczeń WNZP w funkcji czasu zarejestrowane przy stałych: napięciu, odległości między elektrodami i czułości, dla wkładu o średnicy 9,9 mm, dla modelu izolatora przepustowego

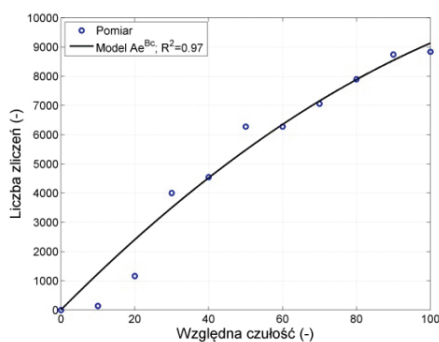
Fig. 8. Counting quantity of the SPDs in function of the registration time by constant the voltage, the distance between electrodes and the sensitivity, for the refill of diameter equal to 9.9 mm, for the bushing isolator model



Rys. 9. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa liczby zliczeń WNZP zarejestrowanych w czasie 30 min, przy stałym napięciu, odległości między elektrodami i czułości, dla wkładu o średnicy 9,9 mm dla modelu izolatora przepustowego

Fig. 9. Probability density distribution of the SPDs counting quantity registered in 30 min by constant the voltage, the distance between electrodes and the sensitivity, for the refill of diameter equal to 9.9 mm, for the bushing isolator model

Rys. 10 przedstawia zależność ilustrującą wpływ wartości względnej czułości zastosowanej kamery UV, jaką można regulować w zakresie od 0 do 100, na liczbę zliczeń WNZP. Parametr czułości reprezentuje nastawiany próg detekcji zliczanych impulsów. Minimalny wykrywalny ładunek odpowiada 2.7 pC przy odległości 10 metrów. Na wykresie zilustrowano wyniki pomiarów oraz przebieg i równanie funkcji aproksymującej uzyskaną zależność. Dla niewielkich czułości duże znaczenie ma szum WNZ, ograniczający liczbę zliczeń. Dla większych progów zależność jest w stosunkowo liniowa. Dla dużych wartości progów układ zliczający WNZ może ulegać nasyceniu.



Rys. 10. Wpływ względnej czułości na liczbę zliczeń WNZP dla stałych: odległości między elektrodami równej 9 cm, napięciu  $0,9 U_p$ , wkładu o średnicy 9,9 mm, dla modelu izolatora przepustowego

Fig. 10. Influence of the relative sensitivity into counting quantity by constant: distance between electrodes equal to 9 cm, voltage  $0,9 U_b$  for the refill of diameter equal to 9.9 mm, for the bushing isolator model

## 4. Podsumowanie

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

- zwiększania wartości napięcia dla zadanej odległości między elektrodami izolatora i stałymi wartościami pozostałych parametrów powoduje wzrost liczby zliczeń WNZP, przy czym istnieje możliwość doboru funkcji aproksymujących zarejestrowane zmiany charakteryzujących się wartościami współczynnika determinacji powyżej 0,9 co świadczy o dużym dopasowaniu trzech zaproponowanych modeli funkcyjnych,
  - istnieje możliwość aproksymowania zależności liczby zliczeń WNZP dla danej wartości napięcia wyznaczonych dla różnych odległości między elektrodami izolatora, przy czym dla zaproponowanej funkcji aproksymującej w postaci:  $Ae^{-Bx}$ , gdzie  $x$  – jest odległością między elektrodami uzyskano zróżnicowane wartości współczynnika determinacji w zakresie od 0,061 do 0,673 co było spowodowane różną liczbą pomiarów wykonanych dla danej wartości napięcia i odległości,
  - zwiększenie odległości w zakresie od 1 do 12 cm między elektrodami dla zastosowanego modelu izolatora przepustowego powoduje zwiększenie liczby zliczanych WNZP, przy czym istnieje możliwość doboru funkcji aproksymujących zarejestrowane zmiany charakteryzujących się wartościami współczynnika determinacji powyżej 0,9 co świadczy o dużym dopasowaniu zaproponowanych modeli funkcyjnych,
  - rejestrując przebieg zjawiska generacji WNZP na badanym izolatorze w czasie 30 min zachowując stałą wartość napięcia zasilającego na poziomie  $0,9 U_p$  i zadanych, stałych wartościach pozostałych parametrów, stwierdzono zmianę liczby rejestrowanych WNZP, którą można opisać za pomocą rozkładu normalnego Gaussa ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,7273$ ,
  - liczba zliczeń WNZP zależy od zadanej przez użytkownika czułości zastosowanej kamery, przy czym zależność można aproksymować za pomocą funkcji:  $Ae^{Bc}$  ( $R^2 = 0,97$ ), gdzie  $c$  – względna wartości czułości
  - użytkownik ma możliwość wybrania jednego z trzech rozmiarów okna zliczającego, przy czym jego wybór w sposób bezpośredni decyduje o liczbie zliczeń WNZP, natomiast nie ma możliwości dowolnego zadania jego rozmiarów,
  - wybór jednej z czterech wartości cyfrowego powiększenia nie ma wpływu na liczbę zliczanych zdarzeń w zadanym oknie i przy określonej przez użytkownika względnej wielkości czułości.
- Podsumowując, kamera UVollé firmy OFIL stanowi skuteczne narzędzie pomiarowe umożliwiające detekcję i rejestrację miejsc występowania WNZP, które wyświetlana są bezpośrednio na widoku badanego izolatora przepustowego. Natomiast zamierzona liczba zliczeń WNZP jest silnie uzależniona zarówno od nastawionych parametrów samej kamery (przede wszystkim od czułości i wielkości okna zliczającego).

## 5. Literatura

- [1] <http://www.test-therm.com.pl/> (odsłona 11.03.2011)
- [2] <http://www.globalspec.com/> (odsłona 11.03.2011)
- [3] Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1996.
- [4] Szczepański Z.: WNZ w izolacji urządzeń elektrycznych. Warszawa, WNT 1973.
- [5] Szczepański Z., Lechowski Z., A. Rosicki, J. Wodziński : Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych. Warszawa, WNT 1978.
- [6] Wodziński J.: Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów. Warszawa, WNT 1997.
- [7] Boczar T.: Analiza zakłóceń w pomiarach akustycznych wylądowań niezupełnych. Studia i Monografie, Wyd. Pol. Op., z. 259, Opole, 2010.

otrzymano / received: 15.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany