

Andrzej Sierota, Lech Zdanowicz, Stanisław Zoledziowski

METODY OPTYCZNEJ DIAGNOSTYKI SPEKTRALNEJ  
WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

1. Wstęp

Wieloparametryczne badania wyładowań niezupełnych, prowadzone od szeregu lat przy współpracy Instytutu Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej i Uniwersytetu w Salford /Wielka Brytania/, wykorzystują analizę efektów świetlnych różnych źródeł wnz. Analiza ta umożliwia rozszerzenie opisu procesów wnz w funkcji różnych parametrów, między innymi ułatwiając ocenę zmienności warunków oddziaływania wnz w funkcji czasu 1 - 4 . Metody detekcyjne wykorzystujące sygnały optyczne wnz pozwalają na wniesienie nowych jakościowo informacji o wnz, zarówno od strony teoretyczno-mechanizmowej, jak i praktycznej, dla oceny skutków oddziaływania wnz na różne dielektryki.

2. Badania efektów świetlnych wyładowań

Zainicjowanie wnz w fazie gazowej zawartej w stałym lub ciekłym ośrodku izolacyjnym ujawnia się przez uformowanie sygnału elektrycznego i świetlnego, które mogą służyć do opisu intensywności i mechanizmów wnz oraz ich zmian w funkcji różnych parametrów.

Detekcja promieniowania wnz w fazie gazowej wykorzystuje emisję określonych długości fal powstających w wyniku przejść cząstek gazu przy ich oświetleniu i umożliwia wykorzystanie różnych technik badawczych.

---

dr inż. A. Sierota, dr inż. L. Zdanowicz - Instytut Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej.

dr S. Zoledziowski - Department of Electrical Engineering University of Salford.

W odniesieniu do dielektryków stałych, badania prowadzono z dielektrykami przezroczystymi /nienapeknlane żywice, szkło organiczne/ w układach modelowych ze sztuczną wtrąciną oraz szczeliną pomiędzy dwiema warstwami dielektryka. Zastosowanie inicjującej elektrody prętowej pozwalało uzyskiwać w tych układach niegasnące wnz, powodujące przyspieszoną degradację dielektryka.

W oparciu o wyniki badań sformułowano szereg hipotez naukowych dotyczących rozwoju wnz we wtrącinach gazowych i ich oddziaływania na dielektryk [1 - 7].

Dla rozszerzenia możliwości interpretacyjnych wyników badania efektów świetlnych wnz konieczne wydaje się rozszerzenie metod badawczych i pogłębienie analiz sygnałów optycznych wyładowań.

Możliwości takie daje zastosowanie optycznej diagnostyki spektralnej, polegającej na rejestrowaniu rozkładów widmowych wnz w funkcji różnych parametrów za pomocą metod fotometrycznych i spektrometrycznych. Ich zaletą jest możliwość analizowania atmosfery gazu przez pomiar zewnętrzny, nie zakłócający całego systemu [8 - 9].

### 3. Optyczna diagostyka spektralna wnz

Wśród metod badawczych służących do analizy promieniowania emitowanego przez wnz w różnych ośrodkach izolacyjnych stosunkowo nieliczne są metody spektralnych analiz emisyjnych wyładowań w gazie.

Wykorzystanie tych badań w najprostrzym podejściu może się ograniczać do oceny widma promieniowania elektromagnetycznego, tj. oceny długości fal. Dość rzadko spotyka się próby identyfikacji linii spektralnych, tj. przypisania im skończonych wartości długości fali, oznaczenie rodzaju przejścia, tj. opisanie go właściwymi parametrami /energii i wagi statystyczne poziomów, siły oscylatorów, współczynnik Einsteina określający prawdopodobieństwo przejścia, a tym samym czas życia poziomu wzbudzonego/ oraz wyznaczenie funkcji kształtu linii, tzw. konturu  $J_L = f(\lambda)$ , gdzie  $J_L$  - intensywność linii mierzona stopniem zaczernienia emulsji fotograficznej. Ponieważ identyfikacji widma można dokonywać jedynie posługując się przyrządami o dużej dyspersji  $D$  i rozdzielczości  $R$  - i to przy użyciu emisyjnych standartów widmowych żelaza czy wodoru, przyrządami jedynie odpowiednimi stają się spektrografy z rejestracją fotograficzną na sta-

zym podłożu. Skomplikowana procedura i konieczność precyzji podczas obróbki danych zniechęca badaczy do stosowania tej techniki.

Znacznie prostsza jest detekcja fotoelektryczna, która jednak, dla choćby w miarę dokładnego rozpoznania widma, wymaga odpowiednich fotopowielaczy i monochromatorów.

Podstawą metody optycznej diagnostyki emisyjnej wnz jest badanie promieniowania wnz w wybranych przedziałach elementarnych  $\Delta\lambda$  /skończona dyspersja/ w funkcji przyłożonego napięcia, czasu jego oddziaływania, rodzaju dielektryka i innych parametrów, przy zastosowaniu wysokiej klasy fotopowielaczy przy stałej spektrograficznej kontroli rodzaju i jakości spektrum [10] .

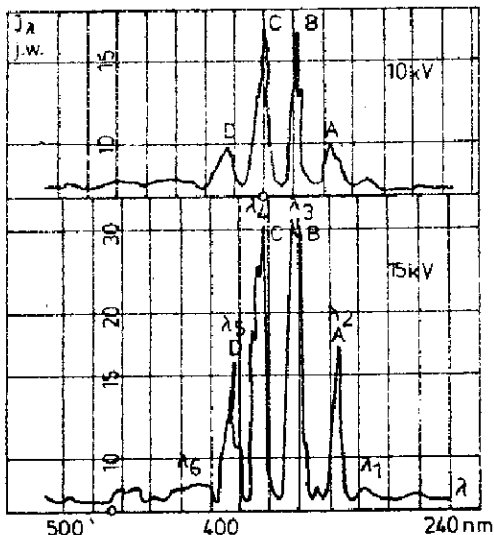
Badania przeprowadzono w układach modelowych ze sztuczną /wentylowaną i szczelną/ wtrąciną w próbkach z przezroczystych materiałów izolacyjnych /nienapełniane EP, plexi, NaCl/ z metalową elektrodą /ostrzową, sferyczną, cylindryczną/ wprowadzoną do wtrąciny oraz w układach modelowych otwartych typu ostrze-płyta z przekładką izolacyjną z różnych dielektryków /nienapełniane i napełniane EP, PE, szkło i inne/.

Dla oceny roli dielektryka w procesach zmiany stanu fazy gazowej i zmian intensywności i struktury widma wykonano również badania wykładawców w układzie ostrze-płyta bez dielektryka. Próby rozpoczynano od napięć bliskich  $U_0$  do wartości ograniczonej wystąpieniem przeskoku powierzchniowego /kilkanaście kV/. Badania w funkcji czasu ograniczono do czasów, w których spodziewana jest quasi-stabilizacja wnz /do 2 godzin/.

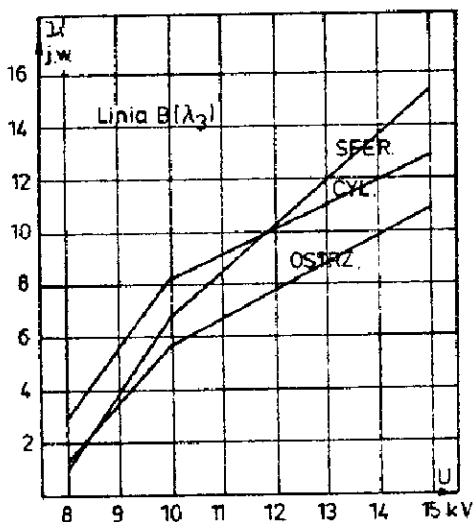
W szczególności optyczna diagnostyka emisyjna wnz uwzględnia :

1/ rejestracją fotoelektryczną promieniowania monochromatycznego z "przemiataniem" widma po długości fali w zakresie 200 - 700 nm. Układ pomiarowy zawiera monochromator i fotopowielacz zaopatrzone w optykę kwarcową oraz elektrometr i rejestrator X-t do zapisu fotoprądu wnz. W układzie rejestrowano /w funkcji różnych parametrów/ rozkłady intensywności promieniowania  $J_\lambda = f(\lambda)$  , rozkłady zmian intensywności wybranych linii spektralnych  $J_\lambda = f(U)$  oraz rozkłady czasowe promieniowania polichromatycznego /fotoprądu/  $J_\Sigma = f(t)$  dla wybranych poziomów napięć probierczych. Zidentyfikowano poszczególne maksima  $J_\lambda$  dla układów z wtrąciną oraz otwartego układu ostrzowego z różnymi dielektrykami /linie A, B, C, D, G / . Dla różnych źródeł wnz uzyskiwano /w różnych warunkach/ te same długości fal /np. linia C dla wtrącin EP i P, z elektrodami

cylindryczną/, bądź długości fal odmienne /dla większości przypadków/.  
Typowe przebiegi rozkładów promieniowania monochromatycznego są podane  
na rys. 1 i 2.



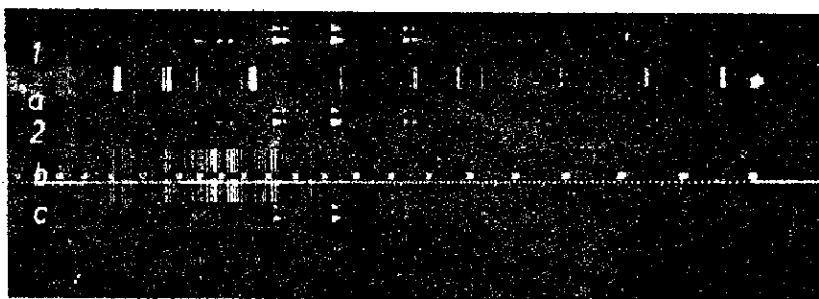
Rys.1. Przykładowy przebieg  $J_{\lambda} = f(\lambda)$  dla wnz w układzie modelowym z wtrąciną szczelną w plexi z elektrodą ostrzową



Rys.2. Przykładowy przebieg  $J_{\lambda} = f(U)$  dla wnz w układzie modelowym z wtrąciną szczelną w EP z różnymi elektrodami

2/ Wyznaczenie układu widmowego i identyfikację spektrum wyładowania w zakresie 200 - 530 nm. Układ pomiarowy umożliwił odwzorowanie optyczne wnz na szczelinie wyjściowej spektrografu za pomocą lampy laserowej, identyfikację widma na płycie spektralnej oraz skalowanie widma za pomocą rozbudowanego układu standardów długości fali /lampa wodorowa, wysoko-

prężna lampa Hg, łuk Fe-Fe/. Przykład widma wnz na zdjęciu stykowym płyty nasświetlonej promieniowaniem ze źródła wnz bez dielektryka podaje rys. 3.



Rys. 3. Widmo wyładowania w układzie ostrze-płyta pomiędzy metalowymi elektrodami dla różnych napięć : 1 - widmo dla  $U = 4,2$  kV, 2 - widmo dla  $U = 3,5$  kV, a - skalowanie Hg, b - skalowanie Fe, c - widmo dla  $U = 3,0$  kV.

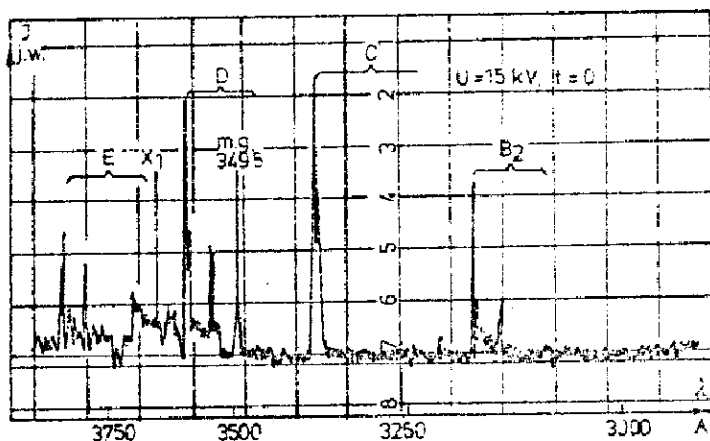
Stosowano czasy nasświetlania płyty fotograficznej /30 sek./ umożliwiające otrzymanie prążków o stopniu zaciemnienia większym niż próg czułości rejestracji fotograficznej /granica zakresu niedoświetleń/.

3/ Oznaczenie cząstek w obszarze wyładowania w układzie analizy mikrofotometrycznej widma. W układzie tym wykonuje się jakościową analizę porównawczą widm za pomocą spektroprojektora, komparatora Abbe, atlasów standartów i wykresów  $J = f(\lambda)$  oraz ilościową analizę porównawczą i wizualizację widm za pomocą mikrofotometru sprzęgniętego z rejestratorem logarytmiczno-całkującym.

Analiza przebiegów  $J = f(\lambda)$  wskazuje na wpływ parametrów prób na zmianę widma wnz. W szczególności stwierdzono wzrost intensywności i struktury widma wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia oraz spadek intensywności widma po 1 godz. czasu trwania próby przy  $U = \text{const}$ . Struktura widm jest złożona, pasma molekularne posiadają wyraźne drgania harmoniczne. Oprócz składowej elektronowej widma posiadają również składowe oscylacyjne i rotacyjne.

Rysunek 4 przedstawia rozciągnięty fragment wykresu  $J = f(\lambda)$  dla wyładowań w układzie ostrze-płyta z przekładką z żywicy epoksydowej.

Tabela 1 przedstawia część wyników określających parametry struktury widmowej /długości fal/ i składu widma /identyfikacja cząstek/ wyładowań pomiędzy elektrodami metalowymi.



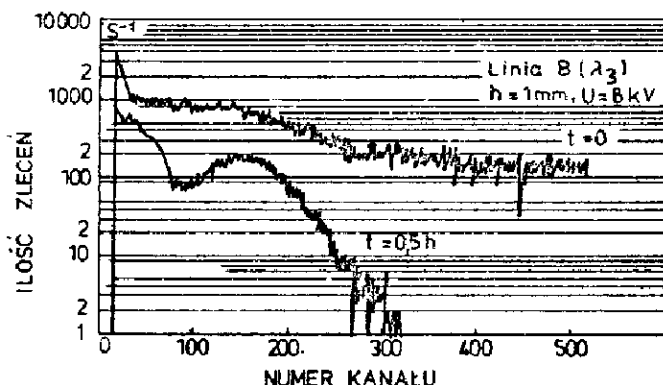
Rys.4. Rozciągnięty fragment rozkładu  $J = f(\lambda)$  widma wnz w układzie ostrze-płyta z przekładką EF

4/ Wyznaczenie rozkładów amplitudowych promieniowania monochromatycznego wnz. Układ pomiarowy jest standardowym układem rejestracji amplitudowej z wielokanałowym analizatorem impulsów, selektorem znaku impulsów wejściowych i blokiem przyrządów spektralnych. Przy jego zastosowaniu otrzymano rozkłady amplitudowe promieniowania monochromatycznego  $N = f(J_\lambda)$  oraz polichromatycznego  $N = f(J_\Sigma)$  dla wybranych długości fali, poziomów napięcia, czasów jego oddziaływania i rodzaju dielektryka. Badano dynamikę zmian amplitudowych rozkładów monochromatycznych. Częstość impulsów w sposób wyraźny zależy od intensywności światła emitowanego na określonej długości fali. Zaobserwowano wpływ napięcia zasilającego, rodzaju dielektryka, atmosfery gazu we wtrącinie i czasu próby na przebieg charakterystyk większości linii widmowych /różne zmiany  $N$  oraz  $J_\lambda$ , ilości maximów, rozkładu w zależności od rodzaju linii/. Rysunek 5 przedstawia przykładowy rozkład gęstości rozkładów amplitudowych dla przypadku układu z wtrąciną.

Tabela 1

Parametry struktury widmowej i składu widna wns pomiędzy metalowymi elektrodami  
w układzie ostrze-płyta,  $h = 1$  mm,  $U = 4,2$  kV /fragment/

Poz.	Przedział szerokości pasma lub grupy linii emisyjnych, długości fal widne emisyjnego $\lambda$	Rodzaj widna	Elementy struktury widna /identyfikowanie/	Elementy i krotność jonizacji	$\lambda$ Å	Oznaczenie	Wagi, inne rejestrowane intensywności
1	5104 - 4987 $\Delta\lambda = 117$	emisyjne-atomowe	prążki	Ni Ni Ni Ni Ni Ni Ni Ni Ni	5045,1 5010,6 5007,3 5005,1 5002,7 5001,4 4994,4 4987,3 4109,98	J	
2	4109,98	emisyjne-atomowe	prążek	Ni	4109,98		
3	3157 - 3079 $\Delta\lambda = 78$	emisyjne-molekularne	głowica maksymalna główne koniec p.	N <sub>2</sub>	3157 3129 3112 3079	B <sub>2</sub>	
4	2379 - 2315 $\Delta\lambda = 64$	emisyjne-atomowe + emisyjne-molekularne	prążek maksymalna maksymalna koniec p.	N <sub>2</sub>	2369 2361 2357 2315	d	struktura rotacyjna na skrajnie, brak głowicy



Rys.5. Typowy rozkład amplitudy  $N = f(J\lambda)$  dla wnz w układzie modelowym z wtrąciną szczelną w EP z elektrodą cylindryczną

#### 4. Wnioski

Wyniki dotychczasowych badań uzasadniają tezę, że przy zachowaniu odpowiedniego reżimu metrologicznego metody optycznej diagnostyki spektralnej umożliwiają nie tylko precyzyjną detekcję promieniowania wnz, ale także szeroko rozumianą analizę jego struktury, składu widmowego, analizę zjawisk wewnątrzcząsteczkowych, lokalizację przestrzenną elementarnych /charakterystycznych/ obszarów promieniowania w źródle wnz; wszystko z możliwością uwzględnienia zależności czasowych. Otrzymane wyniki potwierdzają dużą czułość ujawniającą się przy zmianach parametrów modelu i warunków prób. Dzięki temu staje się możliwe badanie szeregu zjawisk niedostępnych dla metod stosowanych dotychczas, np. analizy amplitudowej promieniowania polichromatycznego z rejestracją fotoelektryczną. Możliwości interpretacyjne uzyskanych wyników są związane z możliwością występowania bogatego widma atomów i molekuł gazu, jak również promieniowaniem cząstek organicznych i dodatków nieorganicznych należących do dielektryka.

Szersze studia przy wykorzystaniu metod optycznej diagnostyki spektralnej /od zakresu X poprzez ultrafiolet do fal długich/ są przedmiotem planów badawczych w Instytucie Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej.



## Literatura

1. Sierota A. : Wpływ geometrii szluzowej wtrącin na skutki oddziaływania wyładowań niezupełnych w układach modelowych z tyłicy epoksydowej. Praca doktorska, Warszawa, 1977, IWN P.
2. Sierota A. : Intensywność i lokalizacja wyładowań niezupełnych w sytuacjach wtrącin gazowych. IV Symp. Podst. Teorii Wyl. Bl. w Gazach, IWN P. 1980, Wilga.
3. Babula E. : Wpływ dołatek organicznych na wyładowania niezupełne w olejach dielektrycznych. Praca doktorska, Warszawa 1981, IWN P.
4. Bujno A., Sierota A. : Badanie przebiegów czasowych impulsów światła i prądu wyładowań. VI Symp. Podst. Teorii Wyl. Bl. w Gazach, IWN P., 1982, Wilga.
5. Sierota A., Babula E. : Wyładowania niezupełne w układach z dielektrykami diekrymami i stałymi. V Symp. Podst. Teorii Wyl. w Gazach, IWN P., 1981, Wilga.
6. Sierota A., Goliński J., Zoledziowski S., Calderwood J.H. : Electro-optical studies of discharges in artificial voids. Proc.Int.Conf.Gas Discharges, IEE CPW 165, 1978, Liverpool.
7. Goliński J., Sierota A., Zoledziowski S., Calderwood J.H. : Partial discharges in a cylindrical void with a metal electrode. IEEE Trans. Vol.B1-17, 1982, No 6.
8. Ornstein L. : Spektrofotometria obiektywna. PWN Warszawa 1958.
9. Zdanowicz L. : Modele temperaturowe łuku łopzeniowego wysokiego napięcia. Praca doktorska, Warszawa 1981, IWN P.
10. Sierota A., Zdanowicz L. : Optyczna diagnostyka wyładowań niezupełnych w materiałach stałych. Opr. O7.5.1, Warszawa 1982, IWN P.