

## WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE W WYBRANYCH UKŁADACH MODELOWYCH ORAZ ANALIZA NUMERYCZNA WARUNKÓW POŁOWYCH ICH POWSTAWANIA

Paweł ZYDRON, Józef ROEHRICH, Paweł MIKRUT, Michał BONK

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział EAIiIB, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

tel.: +12 6174416, +12 6172835 e-mail: pzydron@agh.edu.pl, roehrich@agh.edu.pl, bonkm@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Wyładowania niezupełne (wnz) powstające w układach izolacyjnych urządzeń wysokonapięciowych mogą przybierać różne formy, zależne od właściwości fizykochemicznych zastosowanych materiałów dielektrycznych, wzajemnej konfiguracji geometrycznej izolacji i układu elektrod oraz rodzaju i geometrii defektu. W artykule przedstawiono wyniki rejestracji i analiz zbiorów impulsów wyładowań niezupełnych powstających w trzech różnych, modelowych układach izolacyjnych (wyładowania ulotowe, wyładowania w zamkniętej inkluzji gazowej zlokalizowanej wewnątrz układu izolacyjnego oraz wyładowania powierzchniowe, powstające w obecności punktu potrójnego *metal-gaz-dielektryk*). Analiza wyładowań dotyczyła specyficznych cech ich obrazów fazowo-rozdzielczych  $D(\varphi, q, n)$ . Biorąc pod uwagę fakt, że pole elektryczne jest podstawową przyczyną powstawania wyładowań niezupełnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych zaprezentowano różnice w rozkładach natężenia pola elektrycznego w badanych układach modelowych.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne, modelowe układy izolacyjne, pole elektryczne, obrazy fazowo-rozdzielcze wnz.

### 1. WPROWADZENIE

Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych są w czasie eksploatacji narażone na wpływ różnego typu oddziaływań (elektrycznych, cieplnych, mechanicznych, itd.), które w efekcie mogą prowadzić do pogorszenia lub nawet całkowitego zaniku ich właściwości izolacyjnych [1]. Uzyskanie długoletniej, bezawaryjnej pracy tych układów stanowi jeden z podstawowych problemów technicznych współczesnej elektroenergetyki, decydujących o jakości dostaw energii elektrycznej oraz niezawodności pracy poszczególnych elementów systemu elektroenergetycznego. Aspekt ten ma duże znaczenie praktyczne, zarówno z przyczyn technicznych i ekonomicznych, jak również ze względu na potrzebę zapewnienia właściwych warunków eksploatacji poszczególnych urządzeń (z uwzględnieniem specyfiki ich konstrukcji oraz właściwości zastosowanych materiałów). Podstawowym narażeniem układów elektroizolacyjnych jest pole elektryczne, zaś jednym z efektów jego działania, jest występowanie *wyładowań niezupełnych*. Zgodnie z definicją, przyjętą w normie międzynarodowej IEC 60270 [2] są to wyładowania elektryczne ograniczone jedynie do części objętości lub powierzchni układu izolacyjnego, przyległe do jednej z elektrod lub nie, które w sposób bezpośredni nie powodują powstania zwarcia międzyelektrodowego. Efektem działania wyładowań niezupełnych mogą być postępujące, trwałe zmiany struktury

i właściwości układu izolacyjnego, które w dłuższym okresie czasu mogą spowodować jego uszkodzenie.

Jednym z podstawowych celów diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych jest wykrycie i rozpoznanie występujących w nich defektów, w tym również takich, których obecność ujawnia występowanie wyładowań niezupełnych. W tym celu stosuje się zarówno znormalizowane, jak i nieznormalizowane metody pomiarowe – elektryczne i nieelektryczne [1-5].

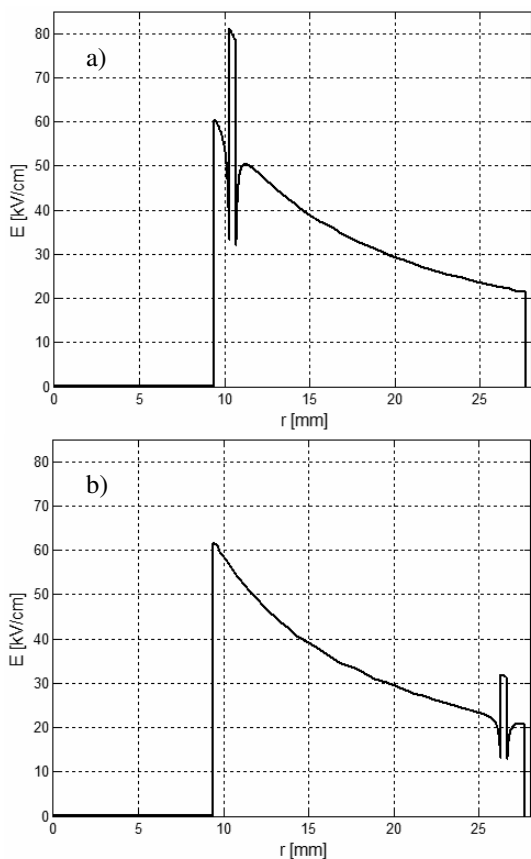
Wyładowania niezupełne mogą przybierać różne formy, zależne przede wszystkim od:

- właściwości fizykochemicznych materiałów zastosowanych w konstrukcji układu izolacyjnego;
- kształtu i wzajemnej konfiguracji geometrycznej układu izolacyjnego i elektrod, wpływających na rozkład pola elektrycznego w układzie izolacyjnym;
- rodzaju, geometrii i położenia defektu, stanowiącego źródło wyładowań;
- rodzaju i wartości doprowadzonego napięcia.

Do podstawowych form wyładowań niezupełnych obserwowanych podczas pomiarów diagnostycznych wykonywanych na urządzeniach elektroenergetycznych zaliczyć można:

- *Wyładowania ulotowe*, powstające w powietrzu, w miejscach, w których przekroczona zostaje wartość krytyczna natężenia pola elektrycznego, co prowadzi do zainicjowania procesów jonizacyjnych i rozwoju lawin elektronowych [6, 7]. Są one charakterystyczne dla urządzeń stacji i linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć. Bardzo często wyładowania ulotowe są podczas pomiarów traktowane jako dodatkowe, synchroniczne względem napięcia probierczego (lub roboczego) zakłócenie, utrudniające wykonywanie właściwych badań izolacji urządzeń.
- *Wyładowania powierzchniowe*, powstające najczęściej na powierzchni dielektryka stałego, inicjowane przy elektrodzie będącej elementem punktu potrójnego *metal-gaz-dielektryk* [8, 9]. Ich cechą charakterystyczną jest to, że powstają na powierzchni materiału izolacyjnego, w obecności składowych: normalnej i stycznej pola elektrycznego. Stan taki występuje np. na powierzchni izolatorów przepustowych oraz izolacji maszyn elektrycznych wirujących, w obszarach części czołowych uzwojeń stojanów.

- *Wyładowania wewnętrzne*, powstające w zamkniętych inkluzjach gazowych o różnej geometrii, zlokalizowanych w izolacji stałej lub ciekłej (np. pęcherze gazowe, pęknięcia i rozwarstwienia izolacji stałej, itp.). Efektem ich działania może być rozwój drzewienia elektrycznego w izolacji stałej oraz innych długotrwałych procesów starzeniowych, prowadzących w efekcie do przebicia izolacji [5]. Ze względu na podstawową rolę wartości pola elektrycznego w mechanizmie powstawania wnz istotne znaczenie mają rozmiar i położenie defektu stanowiącego ich źródło. Dla przykładu, na rysunku 1 przedstawiono wyznaczone w programie *FEMM* rozkłady natężenia pola elektrycznego wzdłuż promienia modelowego kabła energetycznego o konstrukcji koncentrycznej (kabel o polu elektrycznym promieniowym) przy obecności inkluzji gazowej w pobliżu żyły (rys. 1a) lub ekranu kabła (rys. 1b).



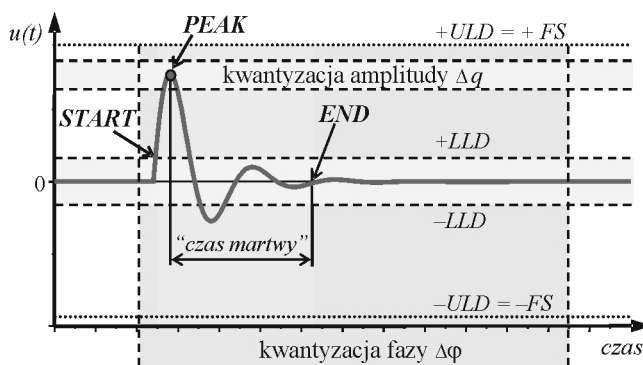
Rys. 1. Wartości natężenia pola elektrycznego wzdłuż promienia  $r$  kabła o konstrukcji koncentrycznej (kabel o polu elektrycznym promieniowym) przy obecności w izolacji inkluzji gazowej: a) w pobliżu żyły kabła, b) w pobliżu ekranu kabła

W artykule przedstawiono wyniki rejestracji i analiz zbiorów impulsów wyładowań niepełnych powstających w wcześniej wymienionych modelowych układach izolacyjnych, odwzorowujących warunki dla powstawania: wyładowań ulotowych w powietrzu, wyładowań powierzchniowych, powstających w obecności punktu potrójnego *metal-gaz-dielektryk* oraz wyładowań w zamkniętej inkluzji gazowej wewnątrz izolacji stałej. Analiza wyładowań dotyczyła specyficznych cech ich obrazów fazowo-rozdzielczych  $D(\varphi, q, n)$ . Różnice w obrazach fazowo-rozdzielczych wynikają z odmiennych warunków ich powstawania, co w metodach diagnostycznych może być stosowane dla rozpoznawania rodzajów defektów układów izolacyjnych.

## 2. REJESTRACJA WNZ METODĄ OBRAZÓW FAZOWO-ROZDZIELCZYCH

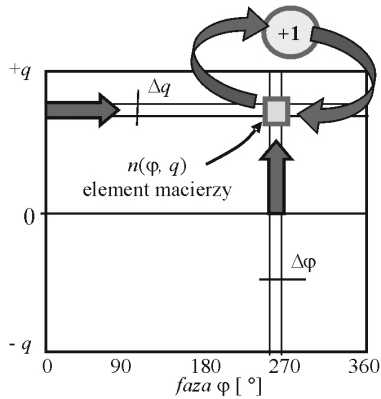
Wyładowania niepełne cechuje stochastyczny charakter procesów fizycznych prowadzących do ich powstawania [5]. W technicznych układach izolacyjnych urządzeń napięcia przemiennego czynnikiem wprowadzającym pewne ich uporządkowanie jest sinusoidalnie zmienne, okresowe napięcie robocze. Rejestrowane cyfrowo impulsy wnz, powstające pod jego wpływem, posiadają pewne specyficzne cechy, charakterystyczne dla poszczególnych form wyładowań. Mogą one być analizowane np. z zastosowaniem metody obrazów fazowo-rozdzielczych, umożliwiającą analizę struktur zbiorów impulsów wyładowań w okresie napięcia probierczego.

Pojedynczy impuls wyładowania jest charakteryzowany przez dwie mierzone wielkości pierwotne: fazę  $\varphi$  wystąpienia wyładowania w okresie napięcia (współrzędna  $x$ ) oraz jego ładunek pozorny  $q$  (współrzędna  $y$ ), określane poprzez pomiar proporcjonalnej do niego wartości szczytowej impulsu napięciowego, obserwowanego na impedancji pomiarowej mającej charakter filtru pasmowego [5]. Rejestracja impulsu rozpoczyna się po przekroczeniu dodatniego lub ujemnego progu dyskryminacji *LLD* (*Low Level Discrimination*) (rys. 2), przy czym  $+LLD = |-LLD|$ . Wartość *LLD* determinuje najmniejszą wartość ładunku pozornego rejestrowanych wyładowań oraz określa szczytową wartość towarzyszących im szumów, które mogą być eliminowane. Wartość szczytowa impulsu (*PEAK*), podlega kwantyzacji, zależnej do rozdzielczości bitowej zastosowanego przetwornika A/C, przy czym najwyższa rejestrowana wartość szczytowa nie może być większa od wartości *ULD* (*Upper Level Discrimination*), w większości przypadków odpowiadającej pełnemu zakresowi przetwarzania  $\pm FS$  (*Full Scale*) tego przetwornika, dla napięć dodatnich lub ujemnych. Ze względu na charakter sygnału napięciowego występującego na impedancji pomiarowej, po detekcji wartości szczytowej stosuje się tzw. „czas martwy”, zapobiegający ponownym rejestracjom wierzchołków oscylacji tego samego impulsu [5]. Kwantowaniu podlega również faza wystąpienia impulsu wyładowania.



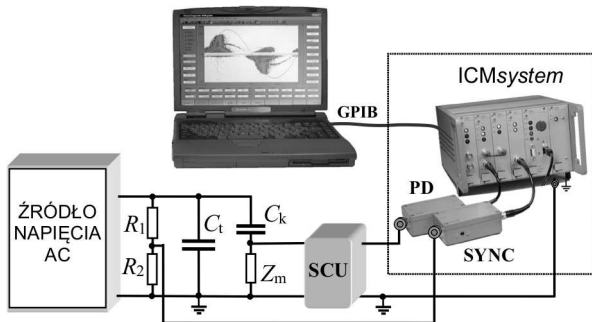
Rys. 2. Rejestracja pojedynczego impulsu wyładowań niepełnych – główne parametry określające warunki akwizycji impulsu

Typowy obraz fazowo-rozdzielczy wyładowań, tworzony zgodnie z algorytmem akumulacji kolejnych impulsów, przedstawionym na rysunku 3, reprezentuje rozkład licznosci  $n$  impulsów zapisanych w komórkach pamięci  $M(i, j)$ , odpowiadających obszarom płaszczyzny *faza-ładunek* o określonych współrzędnych  $(\varphi, q)$ . W pomiarach opisanych w artykule stosowano system rejestracji wyładowań z pamięcią obrazu o rozmiarze 256x256 komórek.



Rys. 3. Ilustracja metody rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niezupełnych

Dla potrzeb analiz przedstawionych w artykule wykonano rejestracje wyładowań niezupełnych powstających w trzech układach modelowych, stosując system rejestracji *ICM System* firmy Power Diagnostix (rys. 4). Uzyskane dane pomiarowe przetwarzano w środowisku programu *Matlab*, przy użyciu własnych procedur numerycznych.



Rys. 4. Struktura stanowiska pomiarowego:  $R_1/R_2$  – dzielnik napięcia,  $C_x$  – pojemność obiektu,  $C_k$  – kondensator sprzęgający,  $Z_m$  – impedancja pomiarowa, SCU – blok kondycjonowania sygnałów, PD – przedwzmacniacz toru impulsów wnz, SYNC – przedwzmacniacz toru napięcia

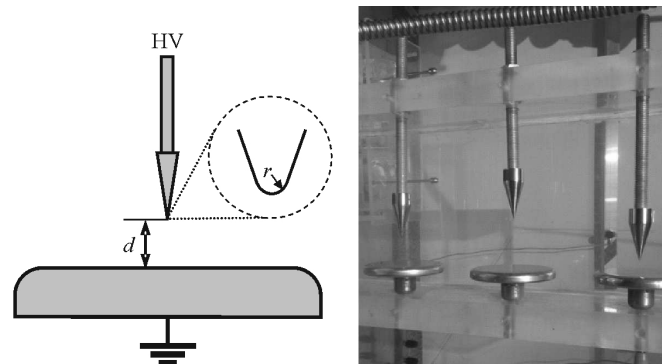
### 3. OBIEKTY, PROGRAM I WYNIKI BADAŃ

W eksperymentach laboratoryjnych zastosowano trzy rodzaje źródeł wyładowań (modelowanych w programie *FEMM*) dla odtworzenia warunków powstawania:

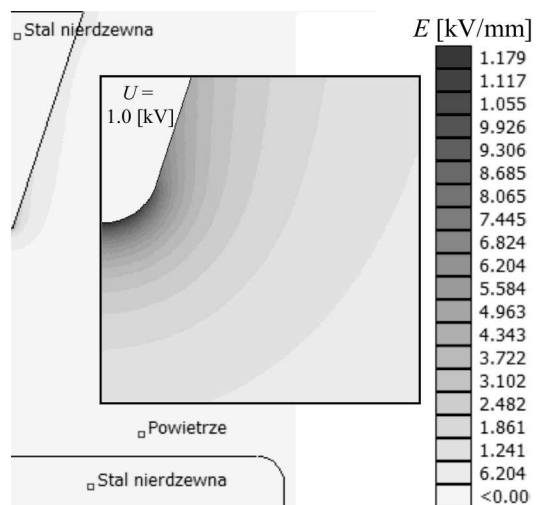
- Wyładowań ulotowych w powietrzu (rys. 5), w postaci układu elektrod *ostrze-płyta uziemiona* z wymiennymi ostrzami o różnych promieniach krzywizny oraz z regulowaną odległością  $d$  od elektrody płaskiej. Na rysunku 6 przedstawiono rozkład natężenia pola wokół ostrza o promieniu krzywizny  $300\ \mu\text{m}$ , zasilanego napięciem  $U = 1\ \text{kV}$ , znajdującego się w odległości  $25\ \text{mm}$  od płyty uziemionej.
- Wyładowań powierzchniowych (rys. 7), w postaci układu IEC profilowanych na krawędziach elektrod ze stali nierdzewnej [10, 11]: zamontowanej na stałe i uziemionej elektrody dolnej o średnicy  $D_1 = 75\ \text{mm}$  oraz elektrody górnej – wymiennej, prętowej (o różnych średnicach  $D_2$ ), zasilanej napięciem probierczym, pomiędzy którymi umieszczono płaską próbkę materiału izolacyjnego stałego. Na rysunku 8 przedstawiono wyznaczony numerycznie rozkład natężenia pola  $E$  w pobliżu końca pręta o średnicy  $D_2 = 6\ \text{mm}$ , zasilanego napięciem  $U = 1\ \text{kV}$ , dla materiału izolacyjnego o grubości  $1,5\ \text{mm}$  i wartości  $\epsilon_r = 3,3$  (guma *EPR*).

– Wyładowań wewnętrznych, występujących w zamkniętej, płaskiej inkluzji gazowej o konstrukcji przedstawionej na rysunku 9. Na rysunku 10 przedstawiono wyznaczony numerycznie rozkład natężenia pola  $E$  w płaskiej, okrągłej inkluzji gazowej o średnicy  $10\ \text{mm}$  i grubości ok.  $300\ \mu\text{m}$ , znajdującej się pomiędzy dwiema płytami szklanymi o grubości  $4\ \text{mm}$  (wartość  $\epsilon_r \approx 6$ ). Wykonane ze stali nierdzewnej, profilowane na krawędziach, elektrody modelu mają średnicę  $40\ \text{mm}$ . Dolna elektroda jest uziemiona, a górna zasilana napięciem  $1\ \text{kV}$ .

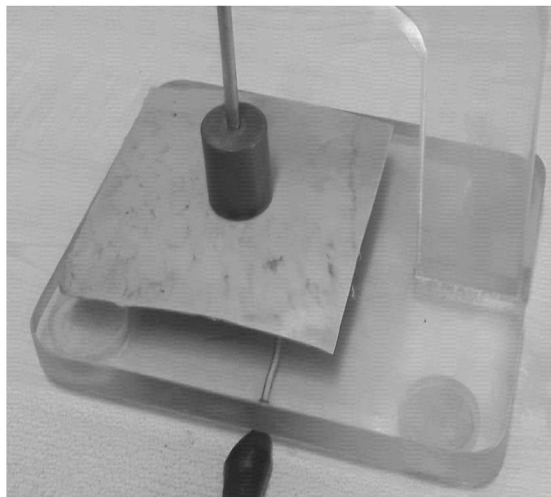
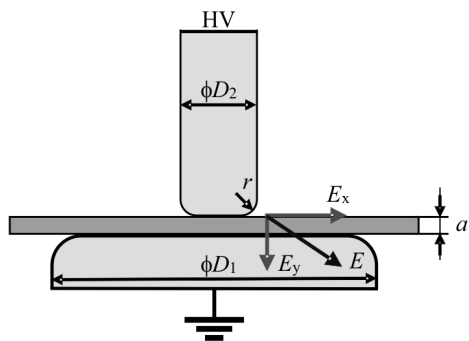
Rozkłady natężenia pola elektrycznego  $E$  wyznaczone dla każdego z trzech opisanych modeli, dla wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych, ukazują różnice, powodujące powstanie odmiennych warunków dla powstawania i rozwoju wyładowań niezupełnych. Układy modelowe charakteryzują się zasadniczo odmiennymi rozkładami pola elektrycznego w obszarach, w których następuje inicjowanie i rozwój wyładowań niezupełnych. W warunkach laboratoryjnych, kontrolując wartość napięcia probierczego wykonano rejestracje zbiorów impulsów wyładowań dla każdego z układów modelowych, przy różnych wartościach napięcia. Początek rejestracji wyładowań dla każdego z trzech układów następował po czasie ok.  $120\ \text{sekund}$  od ustalenia na układzie napięcia probierczego. Każdy pojedynczy pomiar trwał  $60\ \text{sekund}$ , co oznacza, że wykrywane były i akumulowane wyładowania z  $3000$  kolejnych okresów napięcia przemiennego.



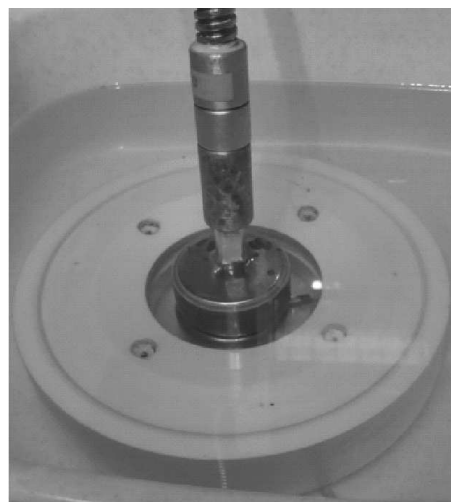
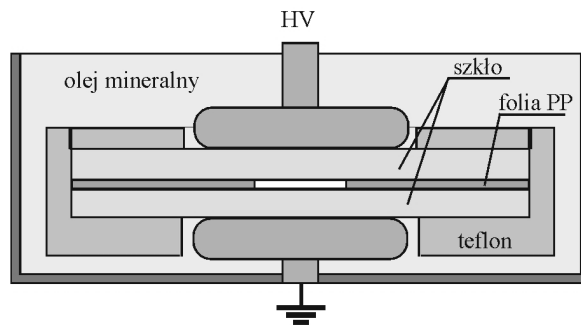
Rys. 5. Układ *Model C*, służący generowaniu wyładowań ulotowych w powietrzu, w konfiguracji elektrod *ostrze-płaszczyzna*, wykonanych ze stali nierdzewnej



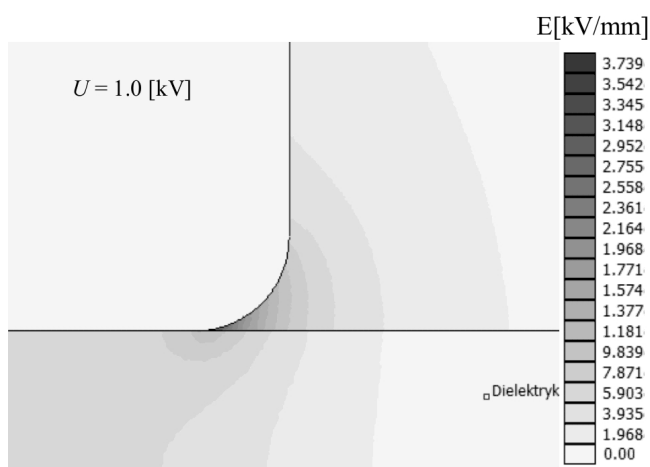
Rys. 6. Rozkład natężenia pola  $E$  dla ostrza o promieniu  $r = 300\ \mu\text{m}$  zasilanego napięciem  $U = 1\ \text{kV}$ , znajdującego się w odległości  $25\ \text{mm}$  od płyty uziemionej (*Model C*)



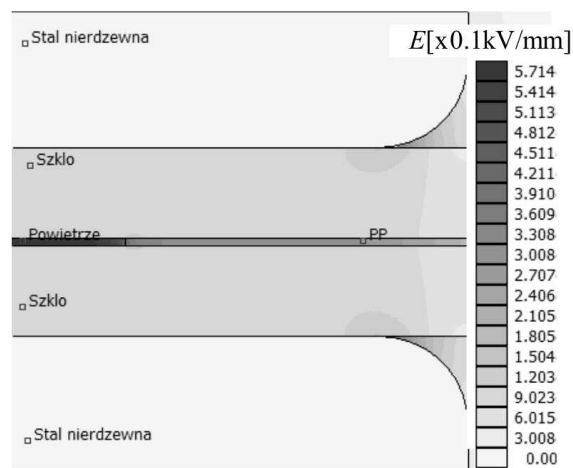
Rys. 7. Układ *Model S*, służący modelowaniu wyładowań powierzchniowych, w konfiguracji zawierającej dwie elektrody ze stali nierdzewnej o średnicach  $D_1 = 75$  mm i  $D_2 = 25$  mm (układ elektrod znormalizowanych IEC [10, 11]), pomiędzy którymi umieszczony został dielektryk stały o grubości  $a = 1,5$  mm (próbka z gumy etylenowo-propylenowej EPR)



Rys. 9. Układ *Model I*, służący modelowaniu wyładowań niepełnych w zamkniętych inkluzjach gazowych; konfiguracja zawiera dwie elektrody ze stali nierdzewnej o profilowanym kształcie, o średnicach  $D = 40$  mm, pomiędzy którymi umieszczono 3-warstwowy układ izolacyjny ze sztucznym defektem, płaską inkluzją gazową o określonej geometrii



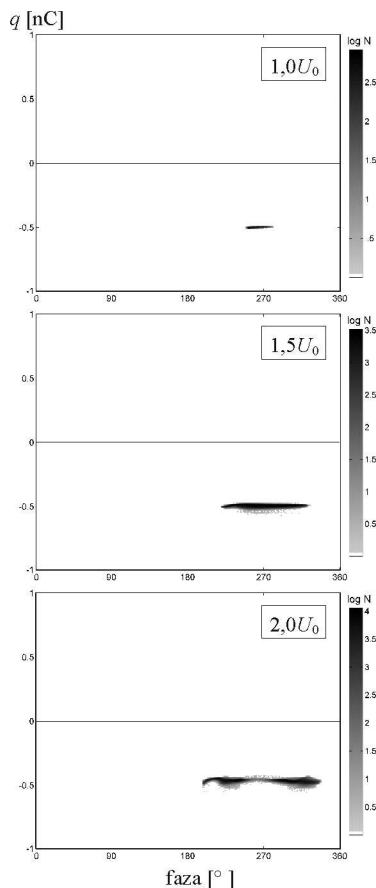
Rys. 8. Rozkład natężenia pola  $E$  w pobliżu końca pręta o średnicy  $D_2 = 6$  mm, zasilanego napięciem  $U = 1$  kV, dla materiału izolacyjnego o grubości 1,5 mm i wartości  $\epsilon_r = 3,3$  (*Model S*)



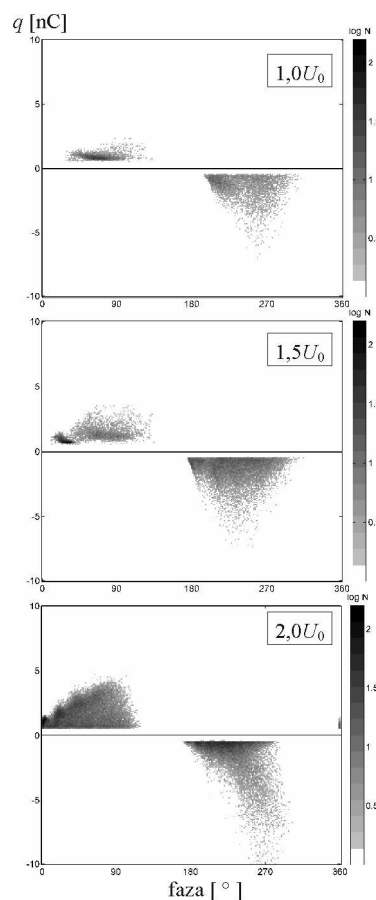
Rys. 10. Rozkład natężenia pola  $E$  w płaskiej, okrągłej inkluzji gazowej o średnicy 10 mm i wysokości 300  $\mu\text{m}$  znajdującej się pomiędzy dwiema płytami szklanymi o grubości 4 mm, dla napięcia pomiędzy elektrodami  $U = 1$  kV (*Model I*)

Analiza rozkładów natężenia pola elektrycznego  $E$ , przedstawionych na rysunkach 6, 8 i 10, wskazuje na znaczące ich różnice, od układu z silnym lokalnym polem o dużej niejednorodności (rys. 6), do układu o niewielkiej niejednorodności z wyraźną symetrią rozkładu w obszarze defektu (rys. 10). W modelach *C* oraz *S* źródła wyładowań są źródłami otwartymi, podczas gdy w modelu *I* wyładowania niepełne powodują wzrost temperatury i ciśnienia gazu zamkniętego w inkluzji gazowej. Ma to istotny wpływ na warunki ich powstawania i rozwoju.

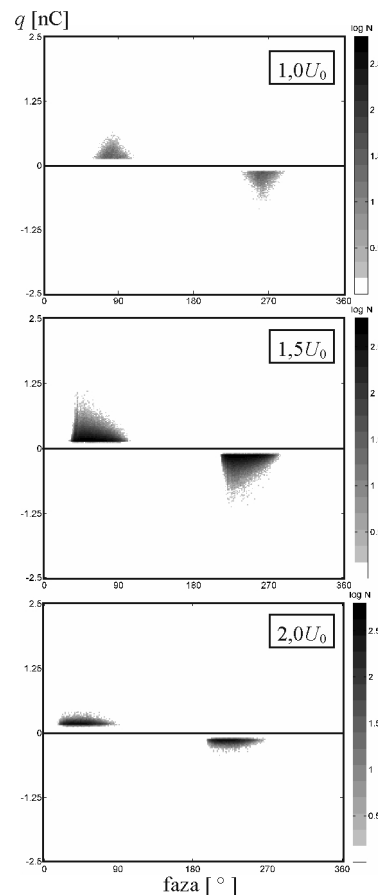
Na rysunkach od 11 do 13 przedstawiono przykłady obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niepełnych  $D(\varphi, q, n)$  dla trzech różnych form wyładowań, uzyskanych podczas ich rejestracji w opisanych układach modelowych. Dla każdej z form zaprezentowano obrazy dla napięć  $1,0 U_0$ ,  $1,5 U_0$  oraz  $2,0 U_0$  ( $U_0$  – napięcie początkowe wyładowań). Częstość występowania impulsów wyładowań na określonej fazie i o określonym ładunku pozornym jest reprezentowana przez liczbę  $n$  wyładowań rejestrowanych w czasie 60 s, kodowaną na obrazie odcieniami szarości.



Rys. 11. Obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań ulotowych rejestrowanych dla układu modelowego *Model C*



Rys. 12. Obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań powierzchniowych rejestrowanych dla układu modelowego *Model S* (górna elektroda o średnicy 6 mm, izolacja: guma EPR o grubości 1,5 mm)



Rys. 13. Obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań wewnętrznych rejestrowanych dla układu modelowego *Model I*; inkluzja gazowa o średnicy 10 mm i grubości ok. 300  $\mu$ m

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Układ *Model C* charakteryzuje się silnie niejednorodnym rozkładem natężenia pola elektrycznego w otoczeniu umieszczonej w powietrzu elektrody ostrzowej. W efekcie prowadzi to do wyraźnego wydzielenia się strefy jonizacji, determinującej zasięg promienia strefy wyładowań ulotowych [7]. Na obrazie fazowo-rozdzielczym wyładowań  $D(\varphi, q, n)$ , w ujemnym półokresie napięcia tworzy się charakterystyczna grupa reprezentująca wyładowania o zbliżonych wartościach ładunku pozornego (impulsy Trichela), lokujące się w zakresach fazy, w których napięcie przemienne osiąga wartość maksymalną. Przy wzroście napięcia do wartości ok.  $2U_0$  ( $U_0$  – napięcie początkowe wyładowań) rozpoczyna się podział tej grupy na dwie części (rys. 11), a następnie obserwuje się poszerzenie zakresu bezimpulsowego i znaczący spadek liczby rejestrowanych wyładowań oraz zmniejszenie ich ładunku średniego [5, 12].

W *modelu S*, w pobliżu elektrody prętowej występuje rozkład natężenia pola elektrycznego  $E$ , który charakteryzuje pojawienie się na powierzchni dielektryka dwóch składowych: normalnej  $E_y$  i stycznej  $E_x$  (rys. 7) Wartości natężenia pola  $E$  oraz zasięg obszaru, w którym mogą rozwijać się wyładowania powierzchniowe są zależne od geometrii elektrody oraz wartości napięcia probierczego. Rejestrowane dla tego modelu obrazy  $D(\varphi, q, n)$  cechuje większa asymetria aniżeli dla wyładowań powstających w wewnętrznej inkluzji gazowej *Modelu I*, dla którego ponadto przy napięciu  $2U_0$  zauważalny jest spadek ładunku pozornego i liczby rejestrowanych wyładowań. Efekty zmniejszenia wartości ładunków wyładowań lub nawet ich zaniku podczas oddziaływania napięcia probierczego były obserwowane w licznych bada-

niach eksperymentalnych [12-20]. Energetyczne działanie wyładowań powoduje wzrost temperatury i ciśnienia gazu wewnątrz inkluzji oraz prowadzi do wzrostu konduktywności jej powierzchni. Są to czynniki powodujące zmniejszenie wartości ładunków wyładowań, a nawet prowadzące do ich czasowego lub trwałego zaniku. Efekty takie mogą być szczególnie widoczne w początkowym okresie czasu, tuż po podaniu napięcia probierczego [14, 15, 18]. Czynnikiem powodującym zmniejszenie liczby rejestrowanych wyładowań może być też efekt aparaturowy związany z wartością progu *LLD*, blokującego rejestrację wyładowań o niewielkich ładunkach. W opisanych badaniach, dla zamkniętej inkluzji gazowej, wspólne działanie wymienionych wyżej czynników może być przyczyną zaobserwowanego obniżenia wartości ładunków wyładowań oraz ich liczby.

Wyniki badań wskazują, że asymetria obrazów fazowo-rozdzielczych  $D(\varphi, q, n)$  jest bezpośrednio związana z asymetrią rozkładu natężenia pola elektrycznego w obszarach, w których dochodzi do powstawania i rozwoju wnz. Jest ona zależna zarówno od geometrii elektrod, jak i od właściwości materiałów układu izolacyjnego. W przypadku inkluzji gazowych wpływ na asymetrię obrazów ma zarówno ich kształt, jak i położenie, skutkujące np. przyległościami inkluzji do elementów wykonanych z materiałów przewodzących [21].

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Florkowska B., Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, Wyd. AGH, Kraków, 2016.
2. IEC 60270:2000 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.
3. IEC TS 62478:2016, High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods.
4. James R.E., Su Q., Condition assessment of high voltage insulation in power system equipment, IET Press, 2008.
5. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydróż P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 2001.
6. Florkowska B., Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. AGH, Kraków, 2003.
7. Adamczyk B., Florkowska B., Pietrzak P., Modelling of electric field distribution for partial discharges in air, Zeszyty Naukowe WEiA PG, nr 46, str. 9-12, 2015.
8. Küchler A., High Voltage Engineering. Fundamentals - Technology – Applications, Springer Vieweg, 2017.
9. Adamczyk B., Florkowska B., Rządkosz M., The modelling of non-linear electric field distribution on the adjacent insulation surfaces, Zeszyty Naukowe WEiA PG, nr 26, str. 13-16, 2009.
10. IEC 60343:1991 Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharges.
11. Kozako M. et al., Surface degradation of polyamide nanocomposites caused by partial discharges using IEC (b) electrodes, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., vol. 11, no. 5, pp. 833-839, 2004.
12. Florkowska B., Włodek R., Pulse height analysis of partial discharges in air, IEEE Trans. on Electr. Insul., vol. 28, no. 6, pp. 932-940, 1993.
13. Gjaerde A. C., Sletbak J., Influence of partial discharges on void gas pressure, Int. Conf. on Partial Discharge, pp. 119-120, 1993.
14. Wang L., Testa L., Cavallini A., Montanari G.C., Relation between the trend of partial discharges and aging models under AC voltage, IEEE 9<sup>th</sup> ICPADM pp. 268-271, 2009.
15. Wang L., Cavallini A., Montanari G.C., Time behavior of gas pressure and PD activity in insulation cavities under AC voltage, Annual Report of CEIDP, pp. 1-4, 2010.
16. Hudon C., Bartnikas R., Wertheimer M. R., Effect of physico-chemical degradation of epoxy resin on partial discharge behavior, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., vol. 2, no. 6, pp. 1083-1094, 1995.
17. Temmen K., Evaluation of surface changes in flat cavities due to ageing by means of phase-angle resolved partial discharge measurement, J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 33, pp.603-608, 2000.
18. Mizutani T., Kondo T., Nakao K., Change in partial discharge properties of a void in LDPE, 1999 Annual Report Conf. on Electr. Insul. and Dielectr. Phenomena, vol. 1, pp. 257-260, 1999.
19. Florkowska B., Florkowski M., Roehrich J., Zydróż P., Partial discharge mechanism in a non-uniform electric field at higher pressure, IET Science, Measurement & Technology, vol. 5, no. 2, pp. 59-66, 2011.
20. Illias H., Chen G., Lewin P. L., Partial discharge behavior within a spherical cavity in a solid dielectric material as a function of frequency and amplitude of the applied voltage, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., vol. 18, no. 2, pp. 432-443, 2011.
21. Montanari G.C., Cavallini A., Ciani F., Partial discharges in internal voids: Dependence on defect position with respect to electrodes, Annual Report of CEIDP, pp. 175-178, 2007.

## PARTIAL DISCHARGES IN SELECTED MODEL INSULATING SYSTEMS AND NUMERICAL ANALYSIS OF FIELD CONDITIONS FOR THEIR INCEPTION

Partial discharges (PD) occurring in insulation systems of high-voltage equipment can take various forms, depending on: the physicochemical properties of used dielectric materials; the geometric configuration of the insulating system and the electrode arrangement; and also the type and geometry of the defect. The paper presents the results of registration and analysis of partial discharge pulses sets generated in three different models of insulating systems (corona discharges; discharge in closed gas inclusions located inside the insulating system, and surface discharge formed in the presence of triple point *metal-solid dielectric-gas*). The analysis of the discharges concerned the specific features of their phase-resolved patterns  $D(\varphi, q, n)$ . The differences in distribution of electric field intensity in the studied insulating systems were also presented, due to the fact that this is the primary cause of partial discharges in high-voltage insulating systems.

**Keywords:** partial discharges, model insulating systems, electric field, PD phase-resolved patterns.