

MODELOWANIE NUMERYCZNE I ANALIZA WARUNKÓW POWSTAWANIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W DEFEKTACH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Paweł MIKRUT, Paweł ZYDRON

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel.: 12 6172835 e-mail: pzydron@agh.edu.pl

Streszczenie: W badaniach wyładowań niezupełnych stosowane są analizy teoretyczne, metody eksperymentalne oraz symulacje numeryczne. Artykuł opisuje rezultaty prac badawczych dotyczących analizy warunków fizykalnych, od których zależy powstawanie wyładowań niezupełnych w wybranych defektach układów izolacyjnych. Przedstawiono podstawowe informacje dotyczące zjawiska powstawania wyładowań niezupełnych wraz z opisem ich potencjalnych źródeł oraz numeryczny model połowy inkluzji gazowej w dielektryku, będącej w pewnych warunkach takim źródłem.

Zamieszczono wyniki symulacji numerycznych rozkładów natężenia pola elektrycznego w defektach o różnych geometriach i rozmiarach, zlokalizowanych w modelowym układzie izolacyjnym. Dla wykonania symulacji zastosowano program komputerowy do analizy pól elektromagnetycznych FEMM v. 4.2.

Słowa kluczowe: układ izolacyjny, wyładowania niezupełne, inkluzja gazowa, modelowanie numeryczne.

1. WPROWADZENIE

Wyładowania niezupełne (wnz) są lokalnymi wyładowaniami elektrycznymi, występującymi w części objętości lub na części powierzchni układu izolacyjnego, które nie powodują w sposób bezpośredni utraty jego właściwości izolacyjnych. W dłuższym okresie czasu ich działanie, poprzez mikro- i makroskopowe zmiany struktury układu izolacyjnego, prowadzić może do wystąpienia wyładowania zupełnego [1, 2]. Podstawowymi źródłami wnz występującymi w układach izolacyjnych są defekty wewnętrzne. Mogą one powstać w fazie projektowania, produkcji lub montażu urządzeń oraz w czasie ich eksploatacji, jako skutek postępujących procesów starzeniowych. Częstymi defektami układów izolacyjnych są:

- wewnętrzne inkluzje gazowe,
- mikrostrza i mikrowtrąciny o dużej krzywiznie,
- powierzchnie graniczne (np. przewodnik/dielektryk).

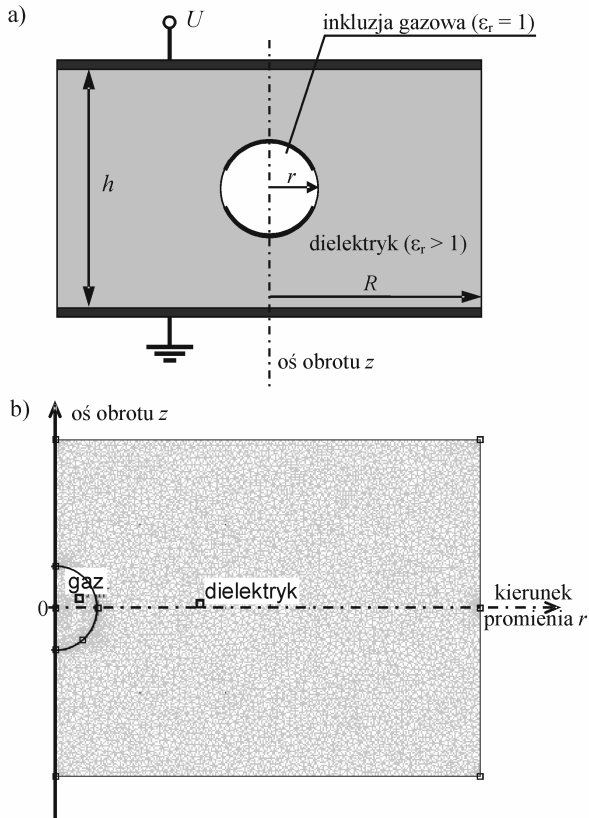
W rzeczywistych układach izolacyjnych defekty te mogą występować równocześnie, łączyć się lub istnieć niezależnie, pojedynczo lub w dużej ilości.

W badaniach wnz stosowane są analizy teoretyczne, metody eksperymentalne i symulacje komputerowe. Celem tych ostatnich jest weryfikacja numeryczna hipotez oraz rozważań wynikających z rozpoznanych lub badanych mechanizmów fizykalnych powstawania i rozwoju wyładowań. Często odniesieniem dla nich są wyniki eksperymentów przeprowadzanych na próbkach modelowych [3-16].

W artykule opisano rezultaty rozważań teoretycznych i symulacji komputerowych dotyczących analizy warunków fizykalnych niezbędnych dla powstawania wnz w defektach wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Przedstawiono informacje dotyczące zjawiska powstawania wnz oraz ich potencjalnych źródeł. Analizowano numeryczny model połowy inkluzji gazowej w dielektryku, będący w pewnych, określonych warunkach źródłem takich wyładowań. Stosując opisany model i modyfikując jego parametry wykonano obliczenia i symulacje numeryczne dla określenia rozkładów natężenia pola elektrycznego w wewnętrznych defektach gazowych o różnych geometriach i rozmiarach, zlokalizowanych w modelowym układzie izolacyjnym. Dla przeprowadzenia obliczeń zastosowano program komputerowy do analizy pól elektromagnetycznych FEMM ver. 4.2. [17], opracowując równocześnie skrypty w języku LUA [18] dla analizy czasowej zmienności rozkładów pola elektrycznego w modelowaniu procesów przepływu ładunków elektrycznych podczas wnz w inkluzji gazowej. Zbadano m.in. wpływ takich parametrów jak: rozmiar, położenie i kształt inkluzji gazowej, wartość napięcia probierczego oraz przenikalność elektryczna dielektryka na rozkład natężenia pola elektrycznego w analizowanym układzie.

2. MODEL INKLUZJI GAZOWEJ

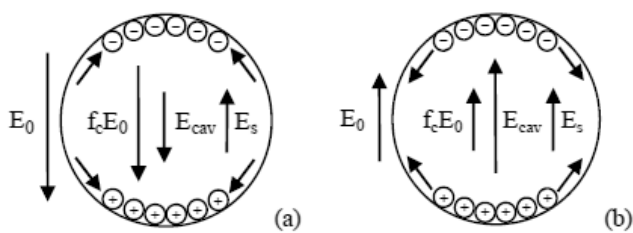
W badaniach, opisanych w artykule, analizowano wirtualny obiekt, będący modelem układu izolacyjnego z dielektrykiem stałym z wewnętrzną inkluzją gazową. Model miał kształt walca, na którym z góry i z dołu znajdowały się dwie płaskie elektrody metalowe. Dolna elektroda była uziemiona, natomiast do górnej przykładano napięcie przemiennie o zadawanej amplitudzie. Model numeryczny służący do komputerowej symulacji rozkładu natężenia pola elektrycznego w inkluzji gazowej umieszczonej w dielektryku został przygotowany w programie FEMM. Jest to model osiowo-symetryczny, odpowiadający walcowej próbce dielektryka z centralnie umieszczoną w niej kulistą inkluzją gazową (rys. 1). Rysunek 1a przedstawia geometrię modelu, z zaznaczonymi powierzchniami inkluzji: górną i dolną, na których następuje symetryczna zmiana ładunku powierzchniowego, symulująca procesy zachodzące podczas pojedynczego wyładowania. Rysunek 1b zawiera zdyskretyzowaną wersję modelu z wygenerowaną wielowęzłową siatką, dającą podstawę dla prowadzenia obliczeń numerycznych.



Rys. 1. Model inkluzji gazowej w dielektryku: a) opis geometryczny modelu, b) model dyskretny dla analizy numerycznej problemu

Natężenie pola elektrycznego w inkluzji gazowej zlokalizowanej wewnątrz izolacji stałej zależy od: geometrii układu izolacyjnego i inkluzji, położenia defektu w układzie, parametrów dielektrycznych materiału izolacyjnego (przenikalność elektryczna, rezystywność skośna i powierzchniowa) oraz kształtu elektrod i napięcia do nich przyłożonego. Dodatkowym czynnikiem, który musi być brany pod uwagę przy analizie polowej jest pole elektryczne pochodzące od ładunków swobodnych obecnych na ścianach inkluzji. Ich położenie i wartość ulegają zmianom m.in. ze względu na występowanie zjawisk relaksacyjnych oraz bardzo dynamicznie zachodzących wzn. Pole pochodzące od ładunków zgromadzonych na ścianach inkluzji może wzmacniać albo osłabiać składowe pola pochodzące od napięcia przyłożonego do zewnętrznych elektrod (rys. 2).

Aby doszło do wyładowania wewnątrz inkluzji muszą zostać spełnione dwa warunki: 1) natężenie pola elektrycznego w inkluzji musi przekroczyć wartość krytyczną; 2) musi się pojawić elektron inicjujący wyładowanie.

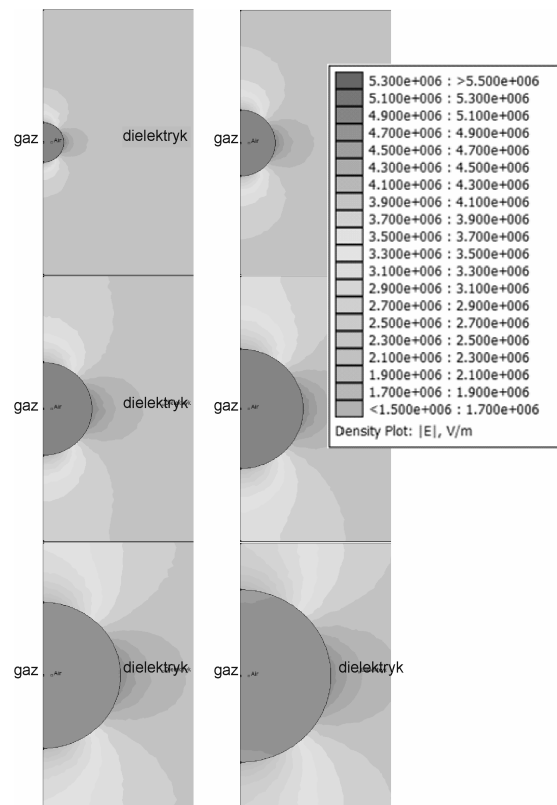


Rys. 2. Ładunki swobodne oraz pola elektryczne w modelowej inkluzji gazowej: a) pole wypadkowe osłabione polem od ładunku, b) pole wypadkowe wzmocnione polem od ładunku. E_0 – natężenie pola w dielektryku, E_s – natężenie pola pochodzącego od ładunku, E_{cav} – wypadkowe natężenie pola w inkluzji, f_c – współczynnik wzmocnienia natężenia pola (na podstawie [12])

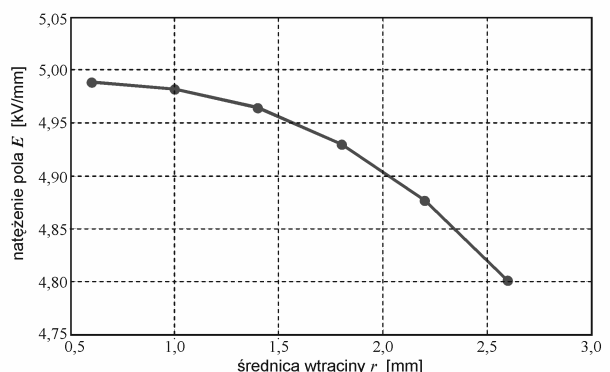
Elektrony swobodne, inicjujące wyładowanie mogą powstać na drodze: 1) jonizacji przestrzennej gazu; 2) jonizacji powierzchniowej, z elektrody metalowej lub dielektryka, 3) generacji z wykorzystaniem ładunku od wcześniejszych wyładowań [7]. Są to stochastyczne procesy fizyczne, więc biorąc pod uwagę zmienność czynników je warunkujących mechanizm powstawania wzn jest opisywany jako niestacjonarny proces stochastyczny [4, 6, 10]. W wykonanych symulacjach numerycznych statystyczna zmienność czasu wystąpienia oraz ładunku wyładowań została zamodelowana poprzez zmianę wartości napięć zapłonu i gaśnięcia każdego kolejnego wyładowania. Napięcia te opisano rozkładami wykładniczymi, a ich wartości były losowane z zastosowaniem generatora liczb losowych.

3. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

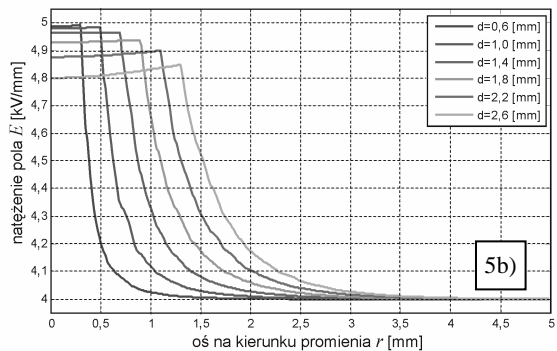
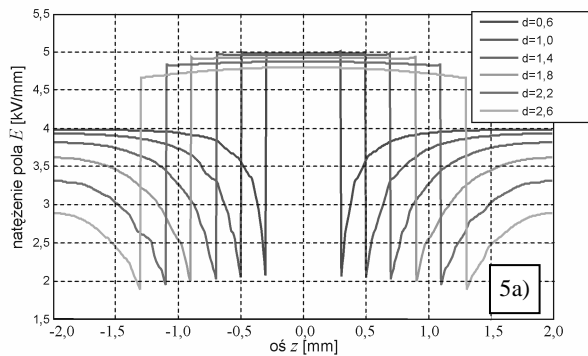
Na rysunkach od 3 do 9 przedstawiono wpływ wybranych parametrów modelu na wartości i rozkłady natężenia pola elektrycznego w inkluzji gazowej oraz powstające przebiegi czasowe wzn.



Rys. 3. Wpływu wielkości inkluzji gazowej na rozkład natężenia pola elektrycznego w inkluzji i jej otoczeniu

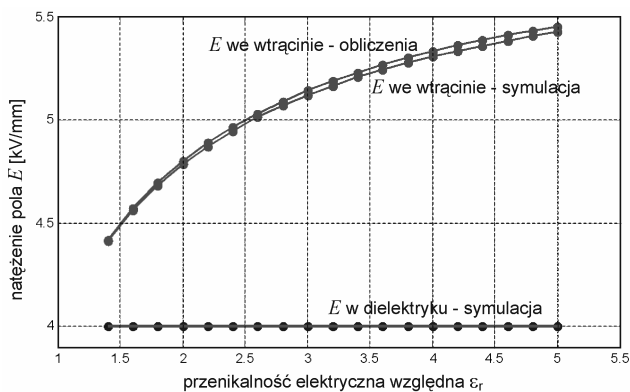


Rys. 4. Wpływu średnicy inkluzji gazowej w modelowym układzie izolacyjnym na wartość natężenia pola elektrycznego w jej wnętrzu

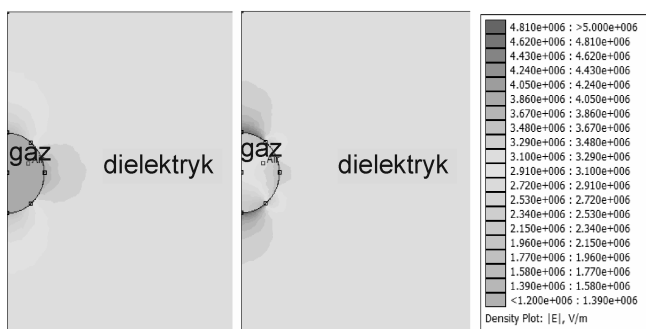


Rys. 5. Wykresy natężenia pola elektrycznego dla inkluzji o różnej średnicy: a) wzdłuż osi obrotu z; b) na kierunku promienia r

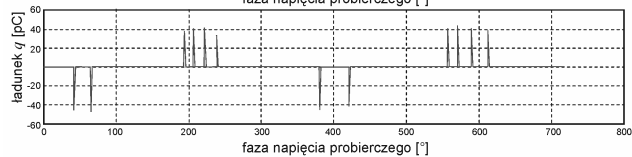
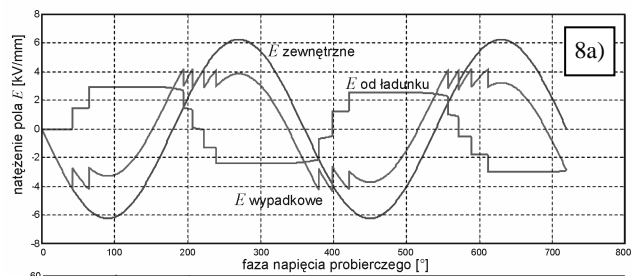
Dla inkluzji idealnie kulistej wykonano również obliczenia i symulacje numeryczne natężenia pola elektrycznego w jej wnętrzu w zależności od wartości przenikalności elektrycznej względnej dielektryka ϵ_r w zakresie od 1,4 do 5 (rys. 6). Pozostałe parametry symulacji nie ulegały zmianom.



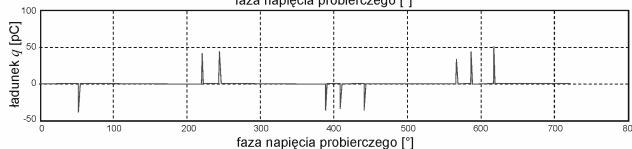
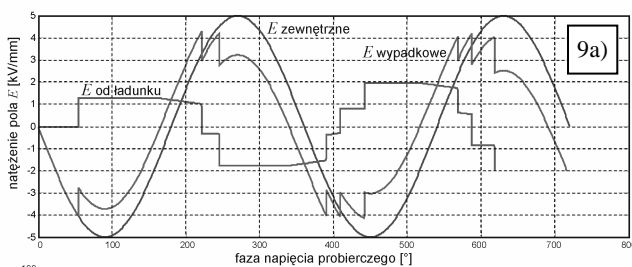
Rys. 6. Natężenie pola elektrycznego w dielektryku i w inkluzji (obliczone i symulowane) w zależności od wartości przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r dielektryka



Rys. 7. Rozkład natężenia pola elektrycznego w gazowej inkluzji kulistej bezpośrednio przed wnz (z lewej) i po wnz (z prawej)



Rys. 8. Przebiegi czasowe natężenia pola elektrycznego w inkluzji oraz ładunku impulsów wnz z uwzględnieniem stochastycznego charakteru wyładowań i procesów zaniku ładunku - analiza wpływu amplitudy napięcia pobierczego: a) $U_{max} = 20$ kV; b) $U_{max} = 24$ kV



Rys. 9. Przebiegi czasowe natężenia pola elektrycznego w inkluzji oraz ładunku impulsów wnz z uwzględnieniem stochastycznego charakteru wyładowań i procesów zaniku ładunku - analiza wpływu szybkości zaniku ładunku: a) 26,5 [nC/s]; b) 80 [nC/s]

4. PODSUMOWANIE

W badanym numerycznym modelu układu izolacyjnego z inkluzją gazową wraz ze wzrostem wielkości inkluzji, natężenie pola elektrycznego w jej wnętrzu maleje. Widoczny jest wówczas spadek wartości natężenia pola elektrycznego na obrzeżach inkluzji w osi równoległej do linii pola elektrycznego oraz wzrost natężenia pola w osi prostopadłej do linii zewnętrznego pola elektrycznego. Wzrost wartości przenikalności elektrycznej ϵ_r powoduje z kolei wzrost wartości natężenia pola w inkluzji.

Wyniki symulacji przebiegów czasowych wykonanych z zastosowaniem języka programowania LUA potwierdziły złożony charakter procesów generacji wzn oraz zauważalny wpływ ładunku powierzchniowego gromadzonego na ścianach inkluzji i procesów jego zaniku na parametry czasowe i ładunkowe powstających wyładowań.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Florkowska B.: Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 1997
2. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 2001
3. Crichton G.C., Karlsson P.W., Pedersen A.: Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., vol. 24, no. 2, 1989, s. 335-342.
4. Van Brunt R. J.: Stochastic properties of partial-discharge phenomena, IEEE Trans. on Electr. Insul., vol. 26, no. 5, 1991, s. 902-948.
5. Niemeyer L., Fruth B., Gutfleisch F.: Simulation of partial discharges in insulation systems, Conf. Proc. of the 7th ISH, Dresden, 1991, paper 71.05
6. Fruth, B.; Niemeyer, L.: The importance of statistical characteristics of partial discharge data, IEEE Trans. on Electr. Insul., vol. 27, no. 1, 1992, s. 60-69.
7. Niemeyer L.: A generalized approach to partial discharge modeling, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., vol. 2 no. 4, 1995, s. 510-528.
8. Gutfleisch, F.; Niemeyer, L.: Measurement and simulation of PD in epoxy voids, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., vol. 2 no. 5, 1995, s. 729-743
9. Morshuis, P.; Niemeyer, L.: Measurement and simulation of discharge induced ageing processes in voids, IEEE CEIDP Annual Report, vol. 2, 1996, s. 520-524.
10. Heitz C.: A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 32, 1999, s. 1012-1023.
11. Altenburger R., Heitz C., and Timmer J.: Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 35, 2002, s. 1149-1163.
12. Illias H., Chen G., Lewin P.L.: Modelling of surface charge decay in a spherical cavity within a solid dielectric material using finite element analysis, Conf. Proc. of the 16th ISH, Johannesburg, 2009
13. Illias H., Chen G., Lewin P.L.: Modeling of partial discharge activity in spherical cavities within a dielectric material, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 27, no. 1, 2011, s. 38-45.
14. 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; 432-443, April 2011
15. Lemke E.: A critical review of partial-discharge models, IEEE Electr. Insul Mag., vol. 28, no. 8, 2012, s. 11-16.
16. Achillides, Z.; Kyriakides, E.; Georghiou, G.E.: Partial discharge modeling: an improved capacitive model and associated transients along medium voltage distribution cables, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., vol. 20, no. 2, 2013, s. 770-781.
17. Meeker D.: Finite Element Method Magnetics Ver. 4.2. User's Manual, 2010 www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf, (dostęp: 2015.02.12)
18. Ierusalimschy R., de Figueiredo L.H., Celes W.: Reference manual of the programming language LUA 4.0 www.femm.info/Archives/doc/refman-4.0.pdf, (dostęp: 2015.02.12)

NUMERICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE CONDITIONS FOR THE INCEPTION OF PARTIAL DISCHARGES IN DEFECTS OF HIGH VOLTAGE INSULATION SYSTEMS

The paper describes the results of theoretical considerations and computer simulations for analysis of physical conditions required for the formation of partial discharge (PD) in gaseous defects located in high-voltage insulation systems. The basic information about the phenomenon of partial discharge along with a description of potential sources and the numerical model of inclusion gas field in the dielectric, which, under certain conditions the PD.

As a result of the research, the article presents: calculations and numerical simulations of the electric field distributions in the internal gaseous inclusions with different geometries and sizes, located in the model system insulation. For the calculation and simulation computer program was used for analysis of electromagnetic fields FEMM.

Keywords: insulating system, partial discharges, gaseous inclusion, numerical modeling.