

Optymalizacja izolatora przepustowego średniego napięcia do zastosowań technologicznych

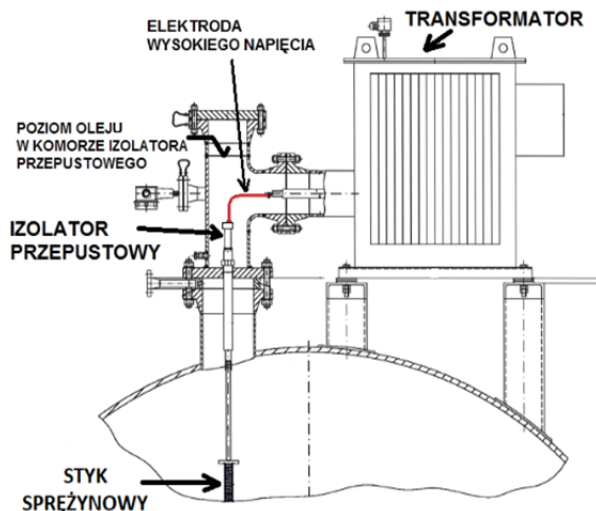
Streszczenie. W publikacji podjęto się rozpoznania przyczyn uszkodzeń izolatora przepustowego średniego napięcia (SN) stosowanego w procesie technologicznym oczyszczania ropy naftowej. Z uwagi na skomplikowany model izolatora wykonano obliczenia symulacyjne w układzie 2D na podstawie których wyznaczono charakterystyki natężenia pola elektrycznego. W obszarach wtrącin powietrznych lub nieprawidłowo dobranej izolacji promieniowej wartości natężenia pola silnie wzrastają powodując wyładowania niezupełne przyspieszające starzenie układu izolacyjnego.

Abstract. The article deals with identifying the causes of damage to a bushing insulator used in the technological process of crude oil purification. Due to the complicated insulator model, simulation calculations were performed in a 2D system, on the basis of which the characteristics of the electric field intensity were determined. Due to the presence of air inclusions or incorrectly selected radial insulation, the electric field intensity increase significantly, causing partial discharges, leading to aging of the insulating system. (**Optimization of medium voltage bushing for technological applications**).

Słowa kluczowe: izolator przepustowy, wyładowania niezupełne, rozkład pola elektrycznego, metoda elementów skończonych,
Keywords: bushing insulator, partial discharges, electric field distribution, finite element method.

Wstęp

Przegląd literatury światowej [1, 4-11] opisuje głównie izolatory przepustowe transformatorowe oraz stacyjne, gdzie występują typowe układy izolacyjne tj.: olej-olej, olej-powietrze, powietrze-powietrze. Izolatory tego typu często stosuje się w aparatach technologicznych, w których w obecności pola elektrycznego dochodzi do przyspieszonego oczyszczania medium np. ropy, nafty z zanieczyszczeń. Wówczas konstrukcja przepustowa wprowadza średnie napięcie z jednostki zasilającej do układu elektrod znajdujących się w aparacie technologicznym, w zbiorniku, jak pokazano na rysunku nr 1.



Rys. 1. Przykładowy zespół urządzeń elektrodehydratora

Izolator wkręcany jest w otwór w komorze ekspansyjnej oleju elektroizolacyjnego i przechodzi do zbiornika z ropą naftową, gdzie panuje środowisko agresywne chemicznie, temperatura ropy 120°C-150°C, ciśnienie 15 bar. W czasie eksploatacji izolatory są narażone na działanie: sił i naprężeń mechanicznych, pola elektrycznego i wysokiej temperatury. Jak pokazują doświadczenia eksploatacyjne służb utrzymania ruchu izolatory przepustowe w takich zastosowaniach są najsłabszym ogniwem całego układu zasilania urządzeń technologicznych. Wymagające środowisko pracy powoduje problemy eksploatacyjne prowadzące do rozszczelnienia izolatorów lub utraty ich

właściwości izolacyjnych. Z jednej strony trudne warunki eksploatacji izolatorów przepustowych, z drugiej strony konieczność zachowania bezpieczeństwa przeciw wybuchowemu stawiają wysokie wymagania wobec rozwiązań konstrukcyjnych i materiałów użytych do produkcji izolatorów. Używany do ich produkcji teflon jest materiałem nowoczesnym i drogim, a stosowane przez producentów optymalizacje kosztów przekładają się niestety na oszczędne rozwiązania techniczne, co może powodować późniejsze problemy eksploatacyjne (rys. 2). Trwałość izolatorów deklarowana przez producenta urządzeń na 2 lata jest wynikiem niezadowalającym wobec rosnących wymagań niezawodnościowych przyjętych w przedsiębiorstwach, gdzie takie urządzenia są eksploatowane.

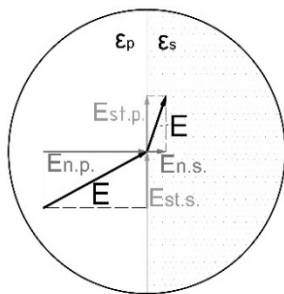


Rys. 2. Uszkodzony izolator przepustowy z demontażu po 2 latach eksploatacji w elektrodehydratorze.

Ograniczanie wnz w izolatorach przepustowych

Wyładowania ślizgowe, które występują w izolatorach przepustowych, są wyzwaniem dla techniki izolacyjnej i niekiedy są trudne do uniknięcia w procesie produkcji. Powstają na powierzchni dielektryka w układach o dużej nierównomierności pola elektrycznego oraz ukośnym uwarstwieniu dielektryka stałego z ośrodkiem gazowym lub ciekłym [2, 3].

W przypadku elektroenergetycznych izolatorów przepustowych na granicy powietrza lub innego ośrodka gazowego lub ciekłego z materiałem stałym następuje zmiana kierunku linii sił pola elektrycznego, przy czym składowe styczne są równe $E_{st,p} = E_{st,s}$ (rys. 3), a normalne spełniają zależność (1).



Rys. 3. Składowe styczne i normalne linii sił pola elektrycznego w układzie przepustowym [2]

$$(1) \quad \frac{E_{n,p}}{E_{n,s}} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_p}$$

gdzie: ϵ_s , ϵ_p – przenikalności dielektryczne względne materiału stałego i powietrza, E_n , E_{st} – składowe normalna i styczna, w powietrzu $E_{n,p}$, $E_{st,p}$ i w materiale stałym $E_{n,s}$, $E_{st,s}$.

Na granicy różnych ośrodków izolacyjnych, znajdujących się w zmiennym polu elektrycznym, następuje skokowa zmiana wartości składowych normalnych wektora natężenia pola – odwrotnie proporcjonalna do przenikalności elektrycznej materiałów, przy czym dla rozwoju wyładowań istotne znaczenie ma składowa styczna pola elektrycznego [1].

Napięcie pojawiania się wyładowań ślizgowych zależy od tzw. pojemności jednostkowej C_0 , zdefiniowanej jako pojemność 1 cm² zewnętrznej powierzchni izolatora w stosunku do przewodzącego sworzni izolatora przepustowego. Pojemność ta zależy od wymiarów izolatora oraz od przenikalności dielektrycznej jego materiału izolacyjnego. Im większa pojemność jednostkowa i przenikalność, tym łatwiejsze staje się odprowadzanie prądów wyładowań do przeciwnej elektrody, a zatem tym niższe jest napięcie, przy którym pojawiają się kanały wyładowań ślizgowych [2]. Napięcie początkowe wyładowań ślizgowych określa wzór Toeplera (2) [1, 2]:

$$(2) \quad U_{sl} = \frac{1,36 \times 10^{-4}}{C_0^{0,44}}$$

gdzie: U_{sl} – napięcie początkowe wyładowań ślizgowych, [kV_{sk}], C_0 – pojemność jednostkowa, [F/cm²].

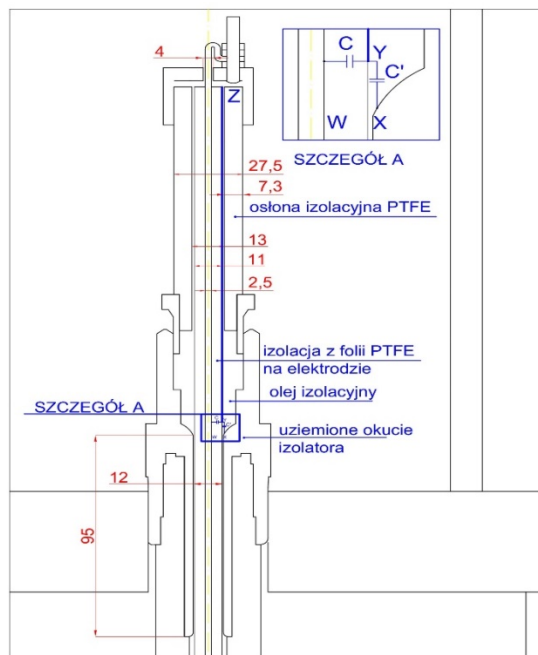
Wzór (2) jest poprawny dla $C_0 > 0,25$ pF/cm², a napięcie przeskoju dla cylindrycznego układu przepustowego o średnicach zewnętrznej i wewnętrznej odpowiednio D , d można wyznaczyć z (3) [1]:

$$(3) \quad U_p = 13 \times l^{0,5} \left(\frac{D \times \ln \frac{D}{d}}{\epsilon} \right)^{0,2}$$

gdzie: U_p – napięcie przeskoju, [kV], l – odległość między elektrodami, [cm]

Obliczenia rozkładu pola elektrycznego w izolatorze

Na rys. 4 przedstawiono warunki zapoczątkowania wyładowania powierzchniowego na odcinku XY przy udziale pojemności C i C' w układzie izolatora przepustowego SN. Izolacja z folii teflonowej na elektrodzie jest narażona na przebicie po krótkiej drodze skośnej XW. W układzie izolacyjnym mamy również do czynienia z dielektrykiem otaczającym, w którym może powstać wyładowanie powierzchniowe na dłuższej drodze XYZ.



Rys. 4. Izolator przepustowy średniego napięcia $U_m=24$ kV – analiza układu uwarstwionego i warunki zapoczątkowania wyładowania powierzchniowego

Wyładowania powierzchniowe w takich układach zależą przy napięciach przemiennych od wytrzymałości dielektryka otaczającego oraz od przenikalności obu materiałów. W przypadku, gdy dielektrykiem otaczającym jest powietrze wyładowania powierzchniowe występują szczególnie łatwo, gdyż jego przenikalność jest mała a wytrzymałość niska. W poniższym opracowaniu zaprezentowano wyniki symulacji uwzględniające również takie sytuacje na przykładzie modeli w symulacjach A oraz D.

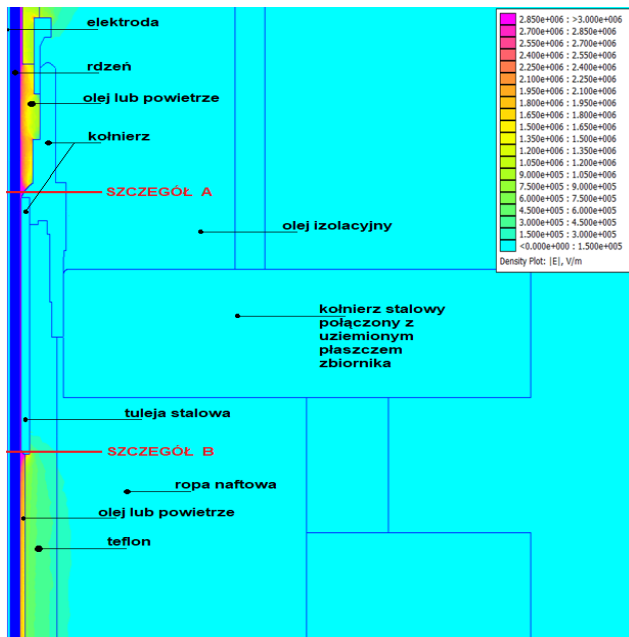
Różnica przenikalności powoduje duże zagęszczenie linii pola elektrycznego na krawędziach uziemionego okucia izolatora z dużymi naprężeniami w powietrzu. Ponieważ przenikalność elektryczna materiału stałego jest kilkakrotnie większa od przenikalności dielektryka otaczającego (np. powietrza) to $C \gg C'$ [3]. Oznacza to, że na C' przypada znaczna część całkowitego napięcia międzyelektrodowego U , co wynika z wartości pojemności C i C' . Silną niejednorodność pola wzdłuż powierzchni granicznej przypisuje się ostremu zakończeniu elektrody uziemionej, lecz również wielkiej różnicy między przenikalnościami [2]. Czynniki te powodują znaczne naprężenia w dielektryku otaczającym na powierzchni XZ, jak oznaczono niebieską linią na rysunku nr 4. Powstają wyładowania niepełne o intensywności większej niż zwykły ulot i rozwijają się one od elektrody uziemionej [3].

Dla analizowanego układu izolacyjnego izolatora przepustowego jak na rysunku nr 4 wykonano obliczenia sprawdzające pojemność jednostkową układu izolacyjnego, wartość napięcia wyładowań ślizgowych, wymaganą długość części izolacyjnej. Otrzymane wartości zestawione z wymiarami rzeczywistymi wykazały poprawność konstrukcji izolacyjnej oprócz górnej części izolatora w obszarze szczegółu A, gdzie uzyskano znaczne wartości składowej promieniowej natężenia pola rzędu 12 kV/mm. Z uwagi na częste uszkodzenia izolatora przeprowadzono obliczenia rozkładu pola elektrycznego w programie FEMM. W module elektrostatycznym wykonano 6 symulacji w układzie osiowo symetrycznym (Tabela nr 1) potwierdzając wykonane wcześniej wstępne obliczenia i uzyskując dodatkowo szereg informacji, co do zmian pola w obszarze

występowania szczelin wypełnionych olejem lub powietrzem.

Tabela nr 1 Przyporządkowanie modelu izolatora przepustowego do symulacji, A-C: rdzeń z tulei PTFE, D - rdzeń z folii PTFE o grubości 0,1 mm, E – jak w D z wypełnieniem olejem przestrzeni między warstwami folii PTFE (bez inkluzji gazowych w rdzeniu), F – jak w D i dodatkowo w rdzeniu inkluzje pomiędzy warstwami folii

	wypełnienie przestrzeni przy rdzeniu	uwagi
A	powietrze wzdłuż rdzenia na całej długości izolatora, izolator przed zalaniem olejem izolacyjnym	- dla symulacji „A”, „B” i „C” przyjęto, że rdzeń izolatora wykonany jest z tulei teflonowej o średnicy wewnętrznej 2,5 mm, średnicy zewnętrznej 11 mm oraz długości 610 mm.
B	olej izolacyjny na całej długości izolatora (brak inkluzji gazowych w oleju)	
C	olej izolacyjny na całej długości izolatora (w oleju zamodelowano inkluzje gazowe powstałe po niewłaściwym odgazowaniu izolatora)	
D	powietrze wzdłuż rdzenia na całej długości izolatora	- dla symulacji „D”, „E” i „F” przyjęto, że rdzeń izolatora jest wykonany z folii teflonowej nawijanej warstwami na elektrodę, tak jak w rzeczywistym izolatorze
E	olej izolacyjny na całej długości izolatora (brak inkluzji gazowych w oleju)	- folia teflonowa nawinięta na rdzeń izolatora ma grubość równą 0,1 mm, szerokość 30 mm i jest nawijana na elektrodę ze skokiem 11,7 mm
F	olej izolacyjny na całej długości izolatora (w oleju zamodelowano inkluzje gazowe powstałe po zalaniu izolatora olejem izolacyjnym)	

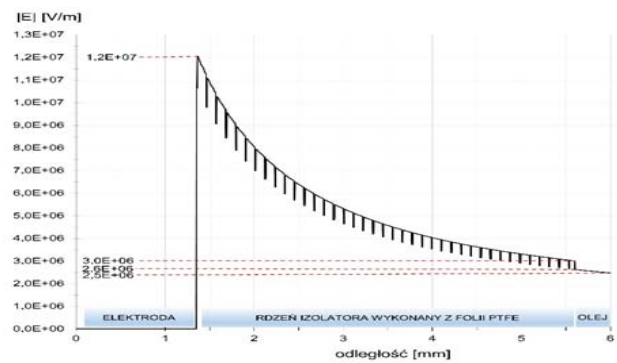


Rys. 5. Rozkład natężenia pola elektrycznego w izolatorze w środkowej części, w miejscu wkręcenia izolatora w otwór montażowy

W programie FEMM założono wytrzymałość powietrza 3 kV/mm, PTFE 65÷85 kV/mm i oleju izolacyjnego 20÷25 kV/mm. Istotne dla rozkładu natężenia pola elektrycznego przenikalności elektryczne wynosiły dla oleju izolacyjnego i teflonu odpowiednio 2,4 oraz 2,1. Przed rozpoczęciem obliczeń określono również wartości dla granic „High Voltage” równe 24 kV tj. napięcie znamionowe izolatora według arkusza danych otrzymanego od producenta urządzenia oraz „Ground” równe 0 V dla elementów uziemionych i przyporządkowano je do poszczególnych linii i luków modelu izolatora.

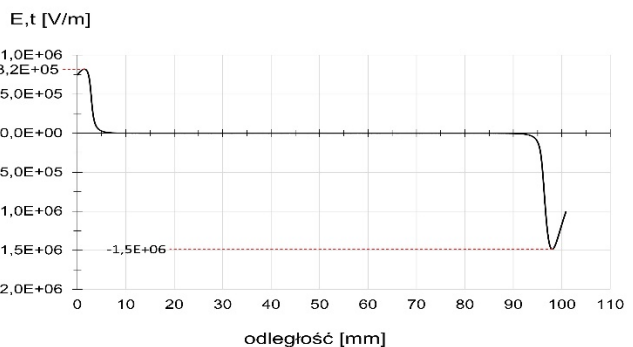
Dla każdego przypadku A-F analizowano rozkład napięcia i natężenia pola elektrycznego wzdłuż całej długości izolatora przepustowego zainstalowanego w zbiorniku. Dla każdego przypadku najwyższe wartości natężenia pola elektrycznego występują w miejscu przejścia elektrody z rdzeniem (średnica 11 mm) przez stalową tuleję w okuciu izolatora (średnica wewnętrzna tulei stalowej - 12 mm). W dalszej części przedstawiono warianty obliczeń dla których wystąpiły krytyczne wartości pola elektrycznego, a charakter ich zmienności w określonych obszarach wskazywał na znaczne prawdopodobieństwo wystąpienia zmian starzeniowych poprzez długotrwałe oddziaływanie wyładowań niezupełnych (rys. 5).

Na rys. nr 6 przedstawiono wykres rozkładu natężenia pola elektrycznego w izolatorze dla modelu E (Tabela 1) dla którego rdzeń wykonano z folii teflonowej, a izolator wypełniono olejem.



Rys. 6. Wykres natężenia pola elektrycznego w izolatorze w środkowej części – symulacja E – rozkład pola dla szczegółu A

W warunkach symulacji założono dokładne wypełnienie olejem szczelin pomiędzy warstwami folii teflonowej, bez możliwości wystąpienia pęcherzyków i szczelin z powietrzem. Przy takich założeniach wartości natężenia pola elektrycznego w izolatorze mieszczą się w granicach wartości dopuszczalnych osiągając około 12,5 kV/mm przy elektrodzie wysokonapięciowej, przy czym dla rozkładu pola występują charakterystyczne niewielkie zmiany natężenia pola E o charakterystycznych niższych wartościach we frakcji olejowej. Rezultat ten wynika z niewielkiej różnicy przenikalności elektrycznej oleju w stosunku do teflonu.

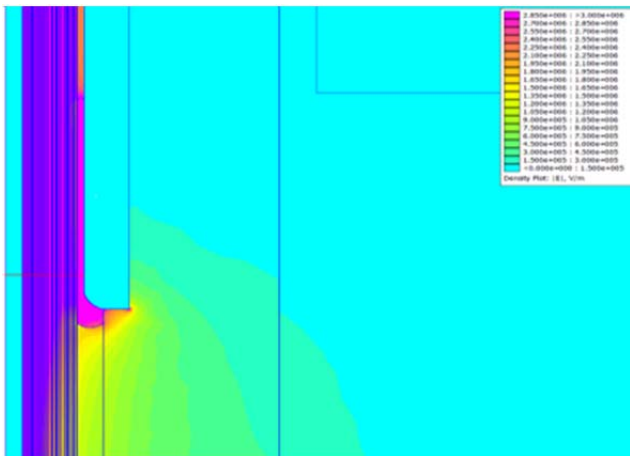


Rys. 7. Wykres natężenia pola elektrycznego w izolatorze w środkowej części – symulacja E – rozkład pola wzdłuż powierzchni granicznej w obszarze od szczegółu A do B według Rys. 5

Dla rozkładu natężenia pola na rysunku 7 w środkowej części izolatora składowe styczne na powierzchni dielektryka otaczającego elektrodę, przy wyjściu z tulei stalowej od strony szczegółu A, osiągają wartość 0,8 kV/mm, natomiast 1,5 kV/mm przy wyjściu z tulei od strony szczegółu B. Obliczone wartości nie przekraczają

zatem wartości krytycznych jakie określono dla powietrza 2,1 kV/mm [4].

Analizując rzeczywiste szerokości szczelin olejowych, a także konstrukcję rdzenia izolatora przepustowego wykonanego według jednego z producentów można sądzić, że izolator po zalaniu olejem będzie zawierał inkluzje gazowe w bardzo wąskich szczelinach olejowych, a także w przestrzeniach pomiędzy warstwami folii teflonowej, jak pokazano na rysunku 8. Jeżeli nawet pierwotnie szczeliny nie wystąpią to na skutek starzenia oleju izolacyjnego i jego degradacji będą się pojawiały w obszarze cieczy pęcherzyki zawierające produkty rozkładu oleju.

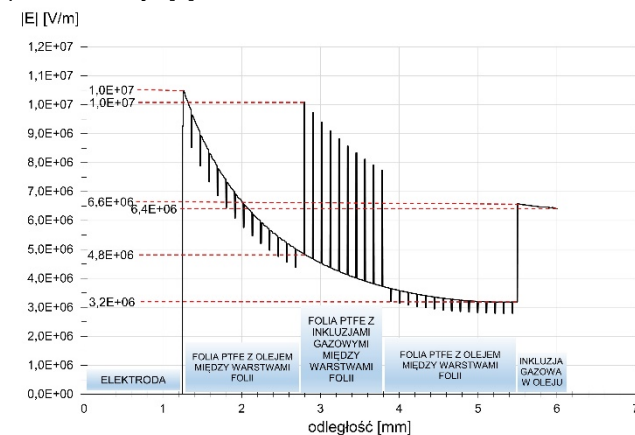


Rys. 8 Symulacja F, szczegół B - Rozkład natężenia pola elektrycznego

W przypadku występowania niewielkich szczelin powietrznych na granicy warstw folii teflonowej rozkład natężenia pola E_{1min} w układzie nie ulega istotnej zmianie. W obrębie szczelin powietrznych następuje jednak około dwukrotny wzrost natężenia pola elektrycznego E_{2max} zgodnie z (4) oraz wynikami obliczeń z rysunku 9.

$$(4) \quad E_A = \epsilon_{r1} \cdot E_{1min} = \epsilon_{r2} \cdot E_{2max}$$

Izolacja przyelektrodowa jest wówczas zdecydowanie bardziej narażona na wystąpienie wyładowań powierzchniowych, co ma także miejsce w przypadku inkluzji gazowych w oleju izolacyjnym. Silnie zjonizowany pęcherzyk gazowy wzmacnia pole elektryczne przy elektrodzie uziemionej i może inicjować mechanizm gazowy przebicia oleju [5].

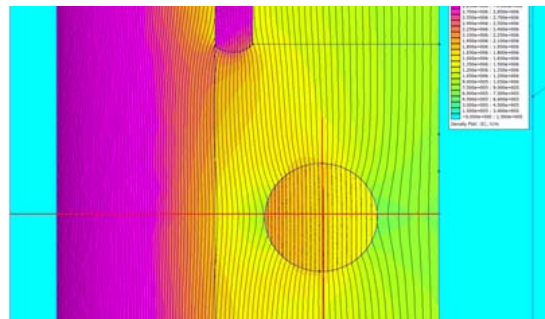


Rys. 9 Symulacja F, szczegół B. Wykres natężenia pola elektrycznego

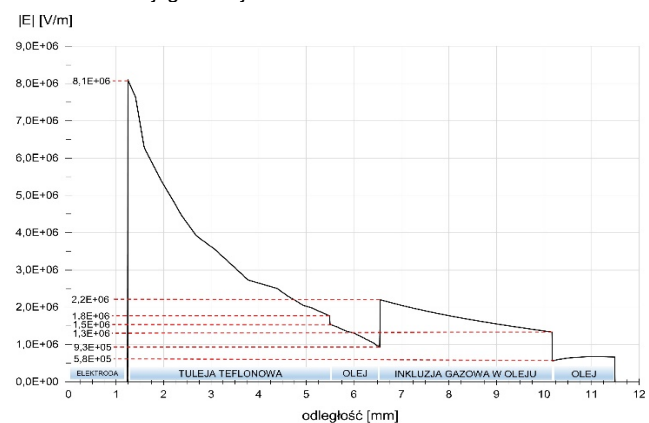
W celu dokładniejszego określenia warunków sprzyjających rozwojowi wyładowań niepełnych prowadzących do degradacji izolatora przeprowadzono

również symulacje dla różnych rozmiarów średnic inkluzji gazowych w szczelinach olejowych w izolatorze. W każdym przypadku obserwowano wzrost natężenia pola elektrycznego E na obrzeżach inkluzji gazowej w osi prostopadłej do linii pola elektrycznego i jego spadek na obrzeżach inkluzji w osi równoległej do linii pola elektrycznego (Rys. 10 i 11).

Dodatkowo wyniki obliczeń wskazują na zmniejszanie wartości natężenia pola elektrycznego we wnętrzu inkluzji wraz ze wzrostem jej wymiaru [5].



Rys. 10 Symulacja C - Geometria zamodelowanej inkluzji gazowej, średnica inkluzji gazowej 3 mm



Rys. 11 Symulacja C, Wykres natężenia pola elektrycznego przez inkluzję gazową na rysunku 10.



Rys. 12 Uszkodzony rdzeń izolatora

Podsumowanie i wnioski

Analiza konstrukcji komercyjnej izolatora przepustowego SN do zastosowania w aparatach zlokalizowanych w strefach zagrożonych wybuchem wskazuje na wady konstrukcji powodujące niską, około dwuletnią trwałość eksploatacyjną.

Wyniki symulacji lokalizują najwyższe wartości graniczne natężenia pola elektrycznego w miejscu przejścia rdzenia izolatora przez tuleję połączoną z uziemionym okuciem izolatora. W badanym modelu izolatora przepustowego z inkluzją gazową w oleju izolacyjnym występującą w obszarze szczegółów A, B lub C może dojść

do rozwoju mechanizmu jonizacyjnego przebicia oleju, zmiany kształtu pęcherzyka i wzmocnienia pola elektrycznego wokół miejsca jego wystąpienia [5]. Określenie wartości dopuszczalnych natężenia pola w tych obszarach wymaga dodatkowych badań modelowych z uwzględnieniem procesów starzenia długotrwałego i monitorowaniem stanu technicznego izolacji poprzez analizę parametrów wyładowań niezupełnych.



Rys. 13. Okucie izolatora

Defekty typu inkluzje gazowe, szczególnie w przypadku szczelin gazowych, osłabiają wytrzymałość elektryczną dielektryków wchodzących w skład układu izolacyjnego badanego izolatora, i przyczyniają się do powstawania wyładowań niezupełnych [6-10].

Zaprojektowana budowa rdzenia w postaci folii teflonowej nawiniętej na elektrodę może posiadać wady tj. pęcherzyki powietrza na granicy warstw folii powstałe już w procesie jej nawijania. Po rozcięciu rdzenia izolatora wzdłuż elektrody można zauważyć obecność oleju elektroizolacyjnego pomiędzy poszczególnymi warstwami zwojów folii teflonowej. Folia teflonowa jest materiałem nienasiąkliwym więc przypuszcza się, że olej wnika pomiędzy warstwy izolacji od góry po elektrodzie.

Rdzeń izolatora zaprojektowany według producenta stanowi układ izolacyjny, w którym opanowanie wyładowań ślizgowych jest bardzo trudnym problemem konstrukcyjnym i materiałowym (rys. 2, 12). Taki układ izolacyjny może sprzyjać powstawaniu iskier ślizgowych, przy stosunkowo niskim napięciu zapiłonu.

W wyniku przeprowadzonych badań modelu izolatora stwierdzono, że zastosowane wąskie szczeliny w konstrukcji izolatora powodują problemy z odpowietrzaniem oleju wewnątrz izolatora. Wykonane symulacje pokazują, że pojawienie się inkluzji gazowych w przestrzeni pomiędzy rdzeniem a okuciem izolatora powoduje przekroczenie dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego w obszarze układu izolacyjnego. W związku z powyższym wskazana jest przebudowa okucia izolatora i powiększenie szczelin olejowych pokazanych na rysunku 13.

Autorzy: mgr inż. Paweł Pankowski, pawel.pankowski@pg.edu.pl,
dr hab. inż. Marek Olesz, marek.olesz@pg.edu.pl; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk,

LITERATURA

- [1]. Pohl Z., Izolatory elektroenergetyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wydanie II, Wrocław, 2000
- [2]. Gacek Z., Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Wydanie II, Gliwice, 2006
- [3]. Gacek Z., Szadkowski M., Wysokonapięciowa technika izolacyjna w przykładach obliczeniowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013
- [4]. Z. Mingxi, et al., The effect of a vertical electric field on the surface flashover characteristics of a bushing model, ENERGIES, 2018
- [5]. Mikrut P., Zydróż P., Modelowanie numeryczne i analiza warunków powstawania wyładowań niezupełnych w defektach układów izolacyjnych wysokiego napięcia, XXV Seminarium pt. „Zastosowanie komputerów w nauce i technice’ 2015”, Gdańsk: Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 46, s. 77-80, 2015
- [6]. Smith D., McMeekin S., Stewart B., Wallace P., Transformer Bushings – Modelling of Electric Field and Potential Distributions within Oil Impregnated Paper with Single and Multiple Spherical Cavities, 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010
- [7]. Hesamzadeh M.R., Hosseinzadeh N., Wolfs P., An advanced optimal approach for high voltage AC bushing design, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 2, pp. 461-466, April 2008
- [8]. Lijun J. et al., Electric field calculation and insulation analysis of high voltage insulating bushing, Shanghai: College of Electronics and Information Engineering, Tongji University.
- [9]. Linsuo Z., Lei Z.: Electrical field analysis and optimizing of high voltage bushing based on Maxwell, International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering, 2014
- [10]. Adamczyk B., Florkowska B., Rzadkosz M., The modelling of non-linear electric field distribution on the adjacent insulation surfaces, XIX Seminarium pt. „Zastosowanie komputerów w nauce i technice’ 2009”, Gdańsk: Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 26, str. 13-16, 2009
- [11]. C37.017-2010 - IEEE Standard for Bushings for High-Voltage [over 1000 V (ac)] Circuit Breakers and Gas-Insulated Switchgear