

Zastosowanie symulacji rozkładu pola elektrycznego w przestrzeni 3D do oceny procesu inicjacji wyładowań elektrycznych w oleju

Streszczenie. W artykule zostały przedstawione wyniki symulacji rozkładu pola elektrycznego dla wybranych modeli elektrod pogrążonych w oleju. Wykorzystane modele to układy użyte w autorskich badaniach eksperymentalnych. Obliczone maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego zostały porównane z wynikami tych badań oraz z danymi literaturowymi w zakresie natężenia pola elektrycznego inicjacji w oleju. Porównanie wskazuje, że istnieje możliwość zainicjowania wyładowań w oleju o czystości technicznej gdy maksymalne natężenie pola elektrycznego jest w zakresie dziesiątek MV/cm.

Abstract. Article presents the results of simulation of electrical field distribution in selected models of electrode setups immersed in oil. There are the models previously used by author in the experimental studies. Calculated values of maximum electrical field stress were compared with the results of these studies and with literature data in the area of inception electrical field stress. Comparison indicates that it is possible to initiate the discharges in oil of technical purity when the maximum electrical field stress in the vicinity of HV electrode is in the range of tenths of MV/cm. **(Using the 3D electrical field distribution simulation for assessment of discharge initiation process in oil).**

Słowa kluczowe: metoda elementów skończonych, pole elektryczne, wyładowania elektryczne, izolacja olejowa.

Keywords: finite element method, electrical field, electrical discharges, oil insulation.

doi:10.12915/pe.2014.06.41

Wstęp

Inicjacja wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych jest tematem obszernych badań od wielu dziesiątek lat. W badaniach tych rozpatrywano inicjację wyładowań zarówno w czystych węglowodorach jak i transformatorowym oleju mineralnym o czystości technicznej. Najczęściej rozpatrywanym układem elektrod był układ typu ostrze- płyta, zaś stosowanym napięciem probierczym udary napięciowe różnego typu [1-12]. Generalnie wykazano, że inicjacja wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych, a następnie ich propagacja, są procesami skomplikowanymi i pociągają za sobą szereg złożonych zjawisk. W zależności od składu chemicznego i właściwości fizycznych cieczy (uwzględniając zanieczyszczenia, domieszki czy pęcherzyki gazowe), ciśnienia i temperatury, napięcia probierczego (DC, AC czy też udary różnego typu), jak również geometrii elektrod tj. stopnia nierównomierności pola elektrycznego, procesami odpowiedzialnymi za inicjację mogą być emisja elektrostatyczna lub jonizacja polowa. Propagacja wyładowań może być natomiast wynikiem jonizacji w fazie gazowej przy niskich napięciach probierczych, bądź w fazie ciekłej, gdy napięcie znacząco (około dwukrotnie), przewyższa 50%-owe napięcie przebicia danej przerwy olejowej [3-9, 13-18].

Zjawiska identyczne jak te obserwowane w układach gołych elektrod o konfiguracji ostrze- płyta zostały także zarejestrowane dla układów elektrod pokrytych izolacją stałą jak papier marszczony czy Nomex. W układach takich, w których rozkład pola elektrycznego jest quasi-równomierny, a więc zbliżony do typowych układów izolacyjnych występujących w wysokonapięciowych olejowych transformatorach energetycznych, kształt przestrzenny wyładowań, emitowane przez wyładowanie światło oraz szybkość propagacji wyładowań były dokładnie takie same jak przy zastosowaniu układów o silnie nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego [13-18].

Kiedy olej mineralny jest cieczą o tzw. czystości technicznej [19-21], dodatkowym zjawiskiem, które silnie determinuje inicjację wyładowań, jest dobrze znany w zakresie techniki izolacyjnej transformatorów energetycznych efekt objętości oleju szczególnie naprężanego. Zgodnie z teorią efektu objętości, natężenie

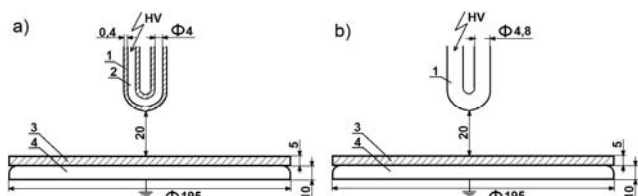
pola elektrycznego, przy którym inicjowane są wyładowania elektryczne w oleju lub następuje jego przebicie zależy od tzw. objętości szczególnie naprężanej. Ta objętość definiowana jest jako objętość pomiędzy elektrodą o większej krzywiznie a powierzchnią ekwigradientną o natężeniu pola elektrycznego równemu 90% wartości maksymalnej. Zatem im więcej zanieczyszczeń stałych czy pęcherzyków gazowych w objętości oleju, tym prawdopodobieństwo inicjacji wyładowań staje się większe. Na bazie takiego rozumowania, dla układów o polu równomiernym i quasi-równomiernym, zostały wyprowadzone uniwersalne eksperymentalne zależności matematyczne, które pozwoliły przedstawić zagadnienie efektu objętości w postaci krzywych prezentujących zależność tej objętości od wytrzymałości elektrycznej rozumianej jako natężenie pola elektrycznego przebicia bądź inicjacji. Zgodnie z tymi krzywymi, ze wzrostem objętości szczególnie naprężanej wytrzymałość elektryczna spada wykładniczo [19, 22-24].

Tło dla prac symulacyjnych

W autorskich pracach eksperymentalnych problem inicjacji wyładowań elektrycznych w oleju mineralnym był rozważany w badaniach związanych z oceną wpływu izolacji papierowej na mechanizm wyładowań elektrycznych w oleju mineralnym pod wpływem napięcia udarowego piorunowego. Na bazie szerokiego spektrum prac eksperymentalnych określono ten wpływ na podstawie przeprowadzonych pomiarów w układzie z izolowaną elektrodą wysokiego napięcia (WN), elektrodą pozbawioną izolacji oraz elektrodą gołą posiadającą takie same wymiary zewnętrzne jak elektroda z izolacją. Dodatkowo uwzględniono podstawowy w tym zakresie układ elektrod ostrze- płyta [15-18]. Na bazie otrzymanych wyników dotyczących wpływu otuliny izolacyjnej na parametry charakteryzujące wyładowania jak napięcie inicjacji, czas do inicjacji czy prędkość propagacji, oraz na kształt rejestrowanych form wyładowczych i przebiegów emitowanego przez nie światła, sformułowano kilka zasadniczych wniosków szeroko skomentowanych w [17].

Z punktu widzenia problemu inicjacji wyładowań w oleju, za najważniejszą z hipotez uznano tę, związaną z czasem do inicjacji wyładowań. Czas ten mówi o opóźnieniu

procesu inicjacji względem momentu doprowadzenia do badanego układu elektrod sygnału napięciowego. We wzmiankowanych badaniach eksperymentalnych oszacowano jak na ten czas wpływa otulina izolacyjna na elektrodzie WN porównując ze sobą przede wszystkim wyniki pomiarów uzyskane dla dwóch z czterech użytych układów elektrod: układu z izolowaną papierem marszczonym elektrodą WN oraz układu z gołą elektrodą WN posiadającą wymiary zewnętrzne elektrody izolowanej. Obie elektrody schematycznie pokazane zostały na rysunku 1.



Rys. 1. Wybrane modelowe układy elektrod wykorzystane w pracach eksperymentalnych: 1 - elektroda WN (pręt mosiężny), 2 - izolacja papierowa, 3 - płyta izolacyjna z prespanu, 4 - elektroda uziemiona

Elektrodę WN w układzie z izolowaną elektrodą stanowił pręt mosiężny o średnicy 4 mm wygięty w kształt dużej litery U. Został on pokryty izolacją z papieru marszczonego o grubości 0,4 mm. W układzie z gołą elektrodą elektroda WN posiadała natomiast średnicę 4,8 mm, a więc uformowana była tak, aby jej wymiary zewnętrzne były identyczne jak wymiary elektrody z izolacją. W obu przypadkach elektrodę uziemioną stanowiła stalowa płyta o średnicy 195 mm umieszczona symetrycznie pod końcem elektrody WN w odległości 25 mm od niej. Ponieważ na płycie uziemionej umieszczono dodatkowo 5 mm płytę z prespanu, wolna przerwa olejowa układu wynosiła 20 mm.

Przy tak skonfigurowanych układach elektrod czas do inicjacji został pomierzony dla dwóch przypadków - przy napięciu inicjacji określonym odrębnie dla poszczególnych układów oraz dla elektrody gołej przy napięciu probierczym równym napięciu inicjacji elektrody izolowanej. W tym drugim przypadku otrzymano więc, uwzględniając fakt, że pomiary wykonano dla tej samej wartości napięcia przyłożonego do układu, te same warunki probiercze [15-18].

Aby wyjaśnić przyjęte w pracach symulacyjnych założenia, w tabeli 1 przytoczone zostały napięcia inicjacji dla poszczególnych układów elektrod otrzymane podczas prac eksperymentalnych. Uwzględniono w niej również dwa pozostałe układy elektrod modelowych tj. układ z elektrodą izolowaną pozbawioną otuliny izolacyjnej (średnica pręta mosiężnego 4 mm) i układ z elektrodą ostrzową o promieniu krzywizny tej elektrody równym 0,25 mm. Napięcie inicjacji reprezentowane jest przez medianą rozkładu Weibulla przy czym uwzględnione zostały obie biegunowości napięcia probierczego [14, 17, 25].

Tabela 1. Napięcia inicjacji wyładowań w oleju mineralnym dla poszczególnych układów elektrod

Biegunowość napięcia	Rodzaj elektrody w układzie	Napięcie inicjacji [kV]
Dodatnia	Izolowana	190
	Goła	173
	Izolowana bez izolacji	148
	Ostrzowa	63
Ujemna	Izolowana	192
	Goła	173
	Izolowana bez izolacji	148
	Ostrzowa	64

Jak wspomniano wyżej, najistotniejszym z punktu widzenia oceny procesu inicjacji było porównanie pomierzonego czasu do inicjacji dla układu z gołą i izolowaną elektrodą WN przy tym samym napięciu probierczym. W zależności od biegunowości zastosowanego udaru napięciowego były to odpowiednio wartości 190 kV dla biegunowości dodatniej i 192 kV dla biegunowości ujemnej. Otrzymane czasy do inicjacji, uprzednio poddane obróbce statystycznej, zostały zestawione w tabeli 2. Opisano je rozkładem logarytm-normalnym, stąd w tabeli zawarto wartość średnią tych czasów t_d oraz odchylenie standardowe σ wraz z odpowiadającymi im przedziałami ufności.

Tabela 2. Czasy do inicjacji wyładowań dla rozpatrywanych układów elektrod: t_d - czas do inicjacji, σ - odchylenie standardowe

Biegunowość napięcia	Rodzaj elektrody	Parametry [μ s]		Przedziały ufności [μ s]
		t_d	σ	
Dodatnia (190 kV)	Izolowana	t_d	4,9	$4,4 < t_d < 5,6$
		σ	1,4	$0,8 < \sigma < 2,3$
	Goła	t_d	5,0	$4,2 < t_d < 6,2$
		σ	1,3	$0,3 < \sigma < 2,9$
Ujemna (192 kV)	Izolowana	t_d	4,6	$3,8 < t_d < 5,5$
		σ	1,8	$0,9 < \sigma < 3,1$
	Goła	t_d	4,7	$3,7 < t_d < 6,2$
		σ	1,4	$0,2 < \sigma < 3,5$

Patrząc na powyższą tabelę i porównując dane dla odpowiednich biegunowości napięcia wyraźnie widoczny jest brak różnic w czasach do inicjacji wyładowań rozwijających się w rozpatrywanych układach elektrod przy tych samych wartościach napięcia probierczego. Obserwacja ta dotyczy zarówno wartości średnich pomierzonych czasów jak i odpowiadających im odchyleń standardowych. Stwierdzono więc na tej podstawie, że skoro czasy do inicjacji są statystycznie rzecz biorąc identyczne, to z dużym prawdopodobieństwem nie ma na nie wpływu struktura powierzchni u której wzięły one początek. Źródłem tzw. słabych punktów odpowiedzialnych za inicjację wyładowań w układzie o izolacji papierowo-olejowej z olejem o czystości technicznej może być więc kąpiel olejowa, a nie powierzchnia metalu elektrody lub otuliny papierowej [15, 17]. Aby nie pozostawić konkluzji o równości czasów do inicjacji tylko na poziomie domniemania statystycznego wynikającego z intuicyjnej interpretacji pomierzonych czasów do inicjacji, hipotezę o równości tychże czasów potwierdzono wykorzystując do tego metodę analizy wariacji (Anova). Ponieważ, zgodnie z wymaganiami stawianymi tej metodzie, liczba elementów wektora zmiennej losowej każdej rozważanej populacji (dane zebrane w trakcie pomiarów dla grupy izolowanych elektrod i elektrody gołej) była podobna a wariancje (czy też odchylenia standardowe) dla porównywanych grup były praktycznie sobie równe, to metoda ta mogła zostać zaaplikowana z powodzeniem w rozważanym zagadnieniu [25, 26].

Hipoteza dla prac symulacyjnych

Posiadając wiedzę na temat oszacowanych wartości średnich czasów do inicjacji, wyznaczonych dla rozpatrywanych przypadków, sformułowana została hipoteza, której weryfikację można było przeprowadzić dzięki wykonaniu symulacji rozkładu pola elektrycznego i obliczeniu na tej podstawie wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego występujących przy danym narażeniu napięciowym. Hipotezę skierowano w stronę wspomnianego we wstępie prawa objętości oleju szczególnie naprężanego i brzmiała ona następująco: Jeśli objętość oleju szczególnie naprężanego tj. będącego pod

wpływem pola elektrycznego o wartości wyższej niż 90% wartości maksymalnej będzie podobna w obu rozpatrywanych sytuacjach (w układzie z izolowaną elektrodą WN oraz elektrodą gołą o wymiarach zewnętrznych elektrody izolowanej), to liczba słabych punktów zawartych w tej objętości będzie także statystycznie identyczna. Stąd, jeśli obliczona maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego będzie taka sama lub zbliżona dla obu układów elektrod, to objętość oleju szczególnie naprężanego powinna być także identyczna biorąc pod uwagę identyczność w wymiarach zewnętrznych obu układów. W takiej sytuacji zaobserwowana równość czasów do inicjacji pomierzonych przy tym samym napięciu probierczym staje się zjawiskiem wytłumaczalnym, gdyż ta sama liczba słabych punktów w objętości oleju da to samo opóźnienie w inicjacji wyładowania. Patrząc na tabelę 2, hipoteza ta, z taką samą mocą, dotyczy obu biegunowości napięcia.

Aby można było mówić o wiarygodności otrzymanych na podstawie symulacji wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego, powinny one zostać odniesione do wartości charakterystycznych natężenia pola elektrycznego inicjacji wyładowań w oleju. W literaturze można spotkać publikacje z tego obszaru podające takie progowe wartości natężenia pola elektrycznego inicjacji zarówno dla układów o nierównomiernym rozkładzie pola (ostrze- płyta) jak i układów o polu równomiernym i quasi-równomiernym [1, 2, 5-8, 10, 14]. Uzyskanie wartości zbliżonych do tych literaturowych dla wszystkich czterech układów modelowych z pewnością zwiększa moc formułowanych wniosków.

Wyniki

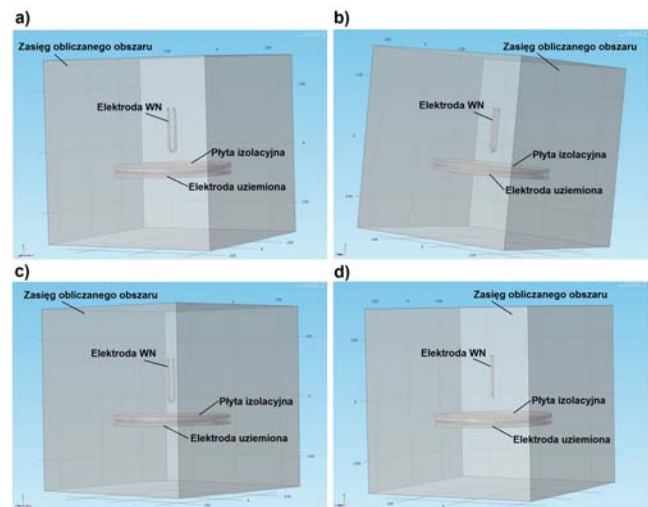
Do analizy rozkładu potencjałów i pola elektrycznego w badanych modelowych układach izolacyjnych wykorzystana została metoda elementów skończonych, która powszechnie stosowana jest do obliczeń zjawisk elektromagnetycznych w układach izolacyjnych urządzeń wysokonapięciowych [19, 21, 27, 28]. Metoda zaaplikowana była w jednym z dostępnych na rynku programów komercyjnych.

W pierwszej kolejności zamodelowano układy elektrod, które odpowiadały układom wykorzystanym wcześniej w pracach laboratoryjnych. Były to: układ elektrod z elektrodą WN pokrytą izolacją papierową, układ z elektrodą gołą o wymiarach zewnętrznych elektrody izolowanej, układ z elektrodą pozbawioną izolacji papierowej oraz układ elektrod ostrze-płyta. Na rysunku 2 zaprezentowano te układy w formie możliwej do przedstawienia za pomocą użytego oprogramowania. Dodatkowo oznaczono na nich ich poszczególne elementy składowe. Niestety ze względu na bardzo zbliżone kształty trzech z czterech układów trudno jest rozróżnić je między sobą. Jakkolwiek inny sposób ich prezentacji nie był możliwy.

Po zamodelowaniu poszczególnych układów przypisano ich elementom składowym materiały, których właściwości odpowiadały właściwościom rzeczywistych materiałów użytych podczas badań eksperymentalnych. Następnie określono przenikalności elektryczne dla poszczególnych materiałów (2,2 dla oleju i 4 dla płyty izolacyjnej z preszpanu oraz izolacji papierowej) oraz przypisano wartości potencjałów zgodne z wartościami napięć inicjacji jakie określono dla poszczególnych układów elektrod. W przypadku elektrody gołej, jak zaznaczono wcześniej, wykonano dodatkowo obliczenia zgodnie z założeniem, że potencjał elektrody WN będzie taki, jak napięcie inicjacji układu z elektrodą izolowaną (w takich warunkach dokonano pomiarów czasów do inicjacji, z którymi należało

skonfrontować wyniki symulacji). Wybranymi wartościami były więc odpowiednio:

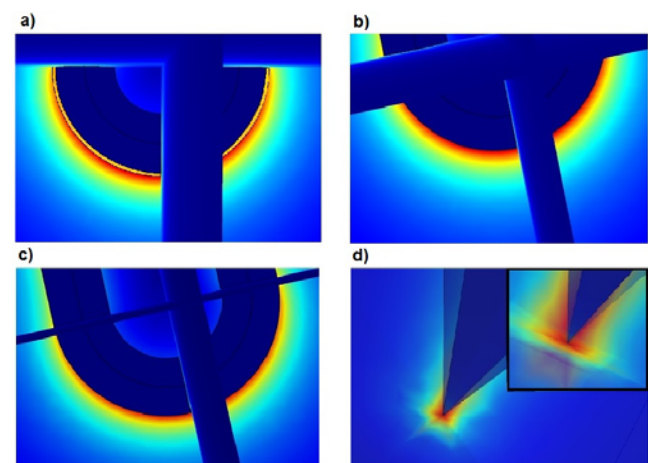
- 190 kV dla układu z izolowaną elektrodą WN,
- 173 kV (jako napięcie inicjacji) i 190 kV dla układu z elektrodą gołą,
- 148 kV dla układu z elektrodą pozbawioną izolacji,
- 63 kV dla układu ostrzowego [17].



Rys. 2. Zamodelowane układy elektrod użyte w symulacjach: a) układ z elektrodą izolowaną, b) układ z elektrodą gołą, c) układ z elektrodą izolowaną pozbawioną izolacji, d) układ z elektrodą ostrzową.

W kolejnym kroku dobrana została w każdym przypadku, zgodnie z założeniami metody elementów skończonych, siatka elementów czworobocznych. Przyjęto zgodnie z oczekiwanymi rezultatami i wiedzą w zakresie obszaru miejsc inicjacji wyładowań, że najgęstszy rozkład elementów będzie występował każdorazowo w obszarze otaczającym elektrodę WN (izolacja olejowa). Pozostały obszar, jak choćby elektroda uziemiona, nie wymagały stosowania siatki o dużej gęstości, gdyż w tym obszarze natężenie pola elektrycznego nie było istotne z punktu widzenia rozpatrywanego zagadnienia. W każdym z przypadków przyjęto taką samą gęstość siatki obliczeniowej, aby móc wiarygodnie dokonać porównania otrzymanych wyników.

Na rysunku 4 zestawiono zbiorczo wyniki symulacji w postaci charakterystycznej dla użytego oprogramowania.



Rys. 3. Wyniki symulacji rozkładu pola elektrycznego: a) układ z elektrodą izolowaną, b) układ z elektrodą gołą przy napięciu równym napięciu inicjacji elektrody izolowanej, c) układ z elektrodą izolowaną pozbawioną izolacji, d) układ z elektrodą ostrzową.

Na przytoczonym rysunku kolor czerwony i jego odcienie reprezentują wartości najwyższe natężenia pola elektrycznego natomiast barwa niebieska z odcieniami wartości najniższe i zero. Podobnie jak przy prezentacji samych modeli układów, ze względu na duże podobieństwo trzech z czterech z nich, pokazanie różnic w wynikach jest stosunkowo trudne. Ponieważ najistotniejszym obszarem do analizy jest obszar znajdujący się w bezpośrednim otoczeniu elektrody WN, wyniki pokazują ten właśnie obszar w powiększeniu. Zgodnie z oczekiwaniami, oraz biorąc pod uwagę wyniki prac eksperymentalnych w tym to obszarze, bezpośrednio przylegającym do elektrody WN, występują wartości maksymalne natężenia pola. Jest to obszar, w którym obserwowano inicjację wyładowań elektrycznych w oleju podczas badań eksperymentalnych [13-18].

W tabeli 3 zestawiono natomiast wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego obliczone w każdym z rozpatrywanych układów elektrod. Podano także wartość potencjału elektrody WN, dla którego wykonano symulację.

Tabela 3. Wartości maksymalnego natężenia pola elektrycznego uzyskane z symulacji

Rodzaj elektrody WN użyty w układzie modelowym	Wartość potencjału przypisanego elektrodzie WN [kV]	Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego [MV/cm]
Izolowana	190	0,40
Goła	190	0,42
Goła	173	0,40
Pozbawiona izolacji	148	0,41
Ostrzowa	63	0,84

Dyskusja wyników

Najbardziej interesującym zagadnieniem z punktu widzenia weryfikacji postawionej wyżej hipotezy jest możliwość porównania przypadku obliczeń wykonanych dla elektrody izolowanej i gołej przy tym samym napięciu probierczym. Oszacowane wartości maksymalnego natężenia pola elektrycznego inicjacji (nie wytrzymałości elektrycznej na przebicie) są bowiem dla tych przypadków niemal identyczne i wynoszą odpowiednio 0,40 MV/cm dla układu z izolowaną elektrodą WN i 0,42 MV/cm dla układu z elektrodą gołą. Wynik zbliżony wynika przede wszystkim z niewielkiej różnicy natury geometrycznej obu układów. Warstwa papieru jest bardzo cienka, a więc mimo zmiany w geometrii nie wpływa na wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego w sposób znaczący. Jakkolwiek jednak, z faktu wprowadzenia pomiędzy elektrodę WN a olej ($\epsilon = 2,2$) materiału o wyższej niż olej przenikalności dielektrycznej (papier o $\epsilon = 4$) różnica w rozkładzie pola elektrycznego występuje, a więc otrzymanie odmiennych wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego z symulacji jest jak najbardziej słuszne w rozważanym przypadku [19-21, 24, 25]. Z drugiej strony należy wziąć pod uwagę fakt, że wymiary części metalowych obu elektrod WN również są nieco inne. Elektroda goła posiadała większą średnicę, gdyż powiększona była o grubość odpowiadającą grubości izolacji papierowej, która spoczywała na elektrodzie izolowanej WN. Nie można było więc oczekiwać identycznych rezultatów w obu przypadkach.

Biorąc pod uwagę, że powyżej opisane układy posiadały quasi-równomierny rozkład pola elektrycznego, co potwierdzone zostało obrazem tego pola otrzymanym z symulacji, relacja pomiędzy oboma układami może zostać sprawdzona poprzez zaaplikowanie znanego wzoru opisującego natężenie pola elektrycznego występujące w układach izolacyjnych uwarstwionych szeregowo [19-21].

Oczywiście, w przypadku gołej elektrody WN równanie to zostaje uproszczone do postaci $E_k = V/a$, a więc umożliwia obliczenie tzw. średniego natężenia pola elektrycznego występującego w danym układzie elektrod. Tak czy inaczej, sam wzór w rozważanym przypadku w żaden sposób nie odzwierciedla rzeczywistej wartości natężenia pola elektrycznego, a jedynie ogólnie panującą relację. Postać wzoru jest następująca:

$$(1) \quad E_k = \frac{V}{\epsilon_k \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\epsilon_i}}$$

gdzie: E_k - natężenie pola elektrycznego w danej warstwie, V - potencjał elektryczny elektrody WN, ϵ - przenikalność elektryczna danej warstwy, a - grubość danego dielektryka, n - liczba warstw [19-21].

Dla rozważanych prostych obliczeń przyjęto dla układu z izolowaną elektrodą WN poniższe dane, zgodne z warunkami pomiarów, a więc: potencjał elektryczny elektrody WN $V = 190$ kV, przenikalność elektryczna papieru $\epsilon_1 = 4$, przenikalność elektryczna oleju mineralnego $\epsilon_2 = 2,2$, grubość izolacji papierowej $a_1 = 0,4$ mm zaś długość przerwy olejowej $a_2 = 20$ mm. W przypadku układu z gołą elektrodą WN potencjał elektrody WN przyjęto również jako 190 kV zaś przerwę olejową jako 20 mm.

Porównując otrzymane wyniki (zestawione w tabeli 4), otrzymana została identyczna zależność jak w przypadku prac symulacyjnych. Zgodnie z oczekiwaniami wyższa wartość natężenia pola elektrycznego występuje dla układu z gołą elektrodą WN i w dalszym ciągu, z powodu cienkiej warstwy izolacji papierowej, różnica pomiędzy oboma układami jest bardzo mała.

Tabela 4. Wartości natężenia pola elektrycznego otrzymane na podstawie wzoru 1

Rodzaj elektrody	E [kV/cm]	
	Warstwa papieru	Olej
Izolowana	51,68	93,97
Goła	95,00	

Odnosząc otrzymane wyniki do postawionej przed rozpoczęciem prac symulacyjnych hipotezy można stwierdzić, że skoro otrzymane wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego są sobie jednak bardzo bliskie, to w obu przypadkach podobna może być też objętość oleju szczególnie naprężanego. W takim wypadku, jeśli objętość ta jest podobna to potencjalna liczba słabych punktów w niej zawarta, która decyduje o możliwości zainicjowania wyładowania w oleju, może być także w obu przypadkach podobna. Cienka warstwa papieru wykorzystana jako otulina izolacyjna elektrody WN, odpowiednio wysuszona i zaimpregnowana, nie wpływa znacząco na rozkład pola, a więc nie jest także istotna z punktu widzenia wpływu na liczbę słabych punktów układu. Można więc uznać, że dla tych samych warunków probierczych (ten sam potencjał elektrody WN) istnieje korelacja pomiędzy pomierzonymi w czasie badań eksperymentalnych czasami do inicjacji, a otrzymanymi dzięki przeprowadzonej symulacji, maksymalnymi wartościami natężenia pola elektrycznego. Ta korelacja potwierdza więc postawioną hipotezę o istotnej roli oleju, jako źródła słabych punktów, w procesie inicjacji wyładowań elektrycznych w układach o izolacji papierowo-olejowej.

Aby uwiarygodnić otrzymane wyniki w zakresie wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i potwierdzić, że mogą to być rzeczywiste wartości natężenia pola elektrycznego inicjacji, porównano je z danymi

literaturowymi. Z danych tych wynika, że wartości natężenia pola elektrycznego inicjacji powolnych wyładowań elektrycznych rozwijających się w oleju mineralnym pod wpływem napięcia impulsowego (nie rozpatruje się w takich rozważaniach biegunowości napięcia) w układach o quasi-równomiernym oraz nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego sięgają, w zależności od stopnia nierównomierności pola i rodzaju cieczy dielektrycznej, od około 0,3-0,5 MV/cm (dla układów o polu równomiernym i quasi-równomiernym i cieczy o czystości technicznej) do nawet kilku czy 2-2,5 MV/cm (dla układów o polu nierównomiernym i cieczy o czystości laboratoryjnej) [1-3, 5-8, 10, 11, 14, 21]. W pierwszym przypadku ogólnie niższe wartości natężenia pola elektrycznego inicjacji są wynikiem równomiernego rozkładu pola i wpływu efektu powierzchni i objętości na wytrzymałość takich układów. W drugim zaś, gdy układy charakteryzują się nierównomiernym rozkładem pola (układy ostrze-płyta), niższe wartości natężenia pola elektrycznego inicjacji obserwuje się przy większym promieniu krzywizny elektrody ostrzowej, co tłumaczy się faktem zwiększenia powierzchni tej elektrody, a więc znów wpływem wspomnianego efektu powierzchni. Jakkolwiek pamiętać trzeba, że wzrost promienia krzywizny powiększa napięcie inicjacji wyładowań. Z drugiej strony wytrzymałość elektryczna niektórych węglowodorów (natężenie pola elektrycznego, przy którym w danych warunkach dochodzi do przebicia) zgodnie z rozważaniami zaprezentowanymi w [1] jest rzędu 1 do 2 MV/cm, a więc inicjacja wyładowań, które zanikają w przestrzeni elektrodowej nie zwierając elektrod powinna być znacznie niższa. Oczywiście rozważania są zależne w dużym stopniu od użytych konfiguracji elektrod, a szczególnie rozpatrywanych przerw międzyelektrodowych w oleju. W przypadku niewielkich przerw (do maksymalnie 5 mm) inicjacja wyładowania praktycznie każdorazowo wiąże się z przebiciem, a więc wartości wytrzymałość w kategorii natężenia pola elektrycznego i natężenia pola elektrycznego inicjacji pokrywają się [2, 3, 5, 14, 21].

Niektóre publikacje podają też, bazując na rozważaniach teoretycznych dotyczących natury fizyko-chemicznej cieczy, wartość progu inicjacji w oparciu o natężenie pola elektrycznego związane bezpośrednio z progiem zjawiska emisji elektrostatycznej lub jonizacji polowej w objętości cieczy. W takim wypadku dla emisji polowej wartości te, przy których rejestrowano prąd stały wyładowań, wynoszą od 7 do 20 MV/cm, przy czym zależą od promienia krzywizny elektrody ostrzowej. Przy większym promieniu i niższej wartości natężenia pola elektrycznego zaobserwowano zjawisko objętości krytycznej, która decyduje o inicjacji wyładowania. Jeśli chodzi o jonizację polową to odpowiednie wartości natężenia przy której ta jonizacja może zająć oceniono na 10 do kilkunastu MV/cm, przy czym wartości te zależą od składu chemicznego cieczy. I tak na przykład wyższe natężenie pola inicjacji powinno charakteryzować cykloheksan, dla którego energia jonizacji wynosi 8,75 eV podczas gdy dla oleju mineralnego o przewodzie związków aromatycznych natężenie to będzie niższe ze względu na energię jonizacji benzenu (pierścień benzenowy jest częścią węglowodorów aromatycznych, które znajdują się w oleju), która wynosi około 7 eV. Należy jednak zaznaczyć wyraźnie, że wartości powyższe dla emisji polowej i jonizacji polowej odpowiadają cieczom idealnym, dla których w rozważaniach nie brano pod uwagę możliwości pojawienia się w ich objętości cząstek zanieczyszczeń stałych lub pęcherzyków gazowych [1, 8, 10, 11, 14].

Ważnym zaznaczenia jest, że przytoczone wartości natężenia pola elektrycznego nie należy jakkolwiek mylić ze wzmiankowanym już średnim natężeniem pola, które

definiowane jest jako stosunek przyłożonego napięcia U do odległości międzyelektrodowej d ($E_{sr} = U/d$). W żaden sposób nie odzwierciedla ono (poza typowymi układami elektrod płaskich) rzeczywistej wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego występującej w danym układzie [3, 5, 8, 9].

Natężenie pola elektrycznego inicjacji obliczyć można też stosując wzór 2, choć jest on użyteczny jedynie do układów typu ostrze-płyta w oleju [6, 8, 9].

$$(2) \quad E_{\max} = \frac{2 \cdot V_0}{r \cdot \ln\left(\frac{4d}{r}\right)}$$

gdzie: E_{\max} - maksymalne natężenie pola elektrycznego występujące w układzie, V_0 - potencjał elektrody WN, r - promień krzywizny elektrody ostrzowej, d - odległość pomiędzy elektrodą WN a elektrodą uziomioną.

W tabeli 5 zestawiono wyniki zastosowania powyższego wzoru dla dwóch wybranych przypadków, w tym dla przypadku rozważanego w autorskich badaniach eksperymentalnych i symulacyjnych. Dla tego przypadku w nawiasie zapisano dla przypomnienia wartość maksymalnego natężenia pola elektrycznego otrzymaną na drodze symulacji. Jak widać zgodność zestawionych wartości jest bardzo bliska.

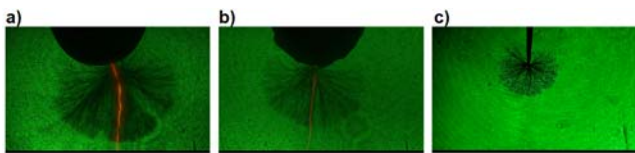
Tabela 5. Wartości natężenia pola elektrycznego otrzymane na podstawie wzoru 2

Dane do obliczeń	Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego E_{\max} [MV/cm]
Przykład lit. [8] $V_0 = 35$ kV, $r = 0,065$ mm, $d = 6$ mm	1,82
Przykład lit. [8] $V_0 = 60$ kV, $r = 0,2$ mm, $d = 6$ mm	1,25
Układ modelowy $V_0 = 63$ kV, $r = 0,25$ mm, $d = 20$ mm	0,87 (0,84)

Na podstawie powyżej przedstawionych danych i porównania ich z wartościami otrzymanymi z symulacji widać, że zarówno dla układów modelowych elektrod o polu quasi-równomiernym jak i układu o typowo niesymetrycznym rozkładzie pola jakim jest układ z elektrodą ostrzową, otrzymano wartości, które są zgodne z powszechnie przyjętym podejściem do zagadnienia inicjacji wyładowań w oleju, czy ogólniej mówiąc w cieczach dielektrycznych. Dla układów o polu bliskim równomiernemu literaturowe wartości natężenia pola inicjacji to 0,3-0,5 MV/cm do około 1 MV/cm [1, 2, 8], podczas gdy wartości opowiadające elektrodom modelowym reprezentującym quasi-równomierny rozkład pola to 0,4 MV/cm. Dla układu niesymetrycznego zaś dane literaturowe mówią o natężeniu pola elektrycznego inicjacji w zakresie 0,5-2 MV/cm (1,25 i 1,82 MV/cm z przykładowych obliczeń), podczas gdy dla rozważanego przypadku układu modelowego z elektrodą ostrzową otrzymano z symulacji 0,84 MV/cm, a z obliczeń 0,87 MV/cm [3, 7, 9, 14]. Biorąc dodatkowo pod uwagę, że powierzchnie elektrod, a także izolacji papierowej w przypadku elektrody izolowanej, zostały w układach symulowanych przyjęte jako gładkie, a więc pozbawione nierówności mogących spowodować lokalne spiętrzenie pola elektrycznego, otrzymane wyniki można uznać za mocno wiarygodne.

Na zakończenie rozważań na rysunku 4 przytoczono trzy fotografie dodatknych wyładowań elektrycznych,

zainicjowanych w oleju mineralnym, otrzymane podczas realizacji autorskich badań eksperymentalnych z użyciem laserowej metody cieniowej [16-18]. Przedstawione przykłady dotyczą odpowiednio układu z izolowaną elektrodą WN, układu z gołą elektrodą WN i układu z elektrodą ostrzową. Zgodnie z wykonaną analizą i przeprowadzonymi obliczeniami ich rozwój został zainicjowany przy natężeniu pola elektrycznego równemu około 0,4 MV/cm przy układach o polu quasi-równomiernym i 0,87 MV/cm dla układu ostrze- płyta. We wszystkich trzech przypadkach kształt przestrzenny zarejestrowanych form wyładowczych odpowiada powolnym wyładowaniom rozwijającym się przy napięciu inicjacji [1, 7, 9, 12]. Porównując te fotografie z wynikami symulacji rozkładu pola elektrycznego wyraźnie widać, że miejsce inicjacji znajduje się w obszarze maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego.



Rys. 4. Przykład wyładowań dodatnich rozwijających się w oleju mineralnym przy napięciu inicjacji: a) układ z gołą elektrodą WN, b) układ z izolowaną elektrodą WN, c) układ z elektrodą ostrzową.

Wnioski

Konkludując powyżej przedstawione rozważania na temat związku pomierzonych eksperymentalnie czasów do inicjacji wyładowań w oleju z otrzymanymi w wyniku symulacji maksymalnymi wartościami natężenia pola elektrycznego można stwierdzić, że:

1) Objętość oleju szczególnie naprężanego i słabe punkty w nim zawarte mogą być z powodzeniem odpowiedzialne za inicjację wyładowań elektrycznych obu biegunowości w oleju mineralnym o czystości technicznej niezależnie od tego czy elektroda WN będzie posiadała izolację papierową czy też będzie pozbawiona tej izolacji. Oczywiście konkluzja ta nie umniejsza roli izolacji papierowej w wysokonapięciowych układach izolacyjnych, natomiast stanowi poparcie słusznego podejścia do szczególnego uwzględnienia jakości oleju izolacyjnego stosowanego w takich układach.

2) Jest możliwe, aby przy maksymalnym natężeniu pola elektrycznego rzędu 0,4-1,0 MV/cm, mogło zostać zainicjowane wyładowanie elektryczne w oleju mineralnym. Szczególnie możliwe jest to gdy olej jest cieczą o czystości technicznej, a więc nie jest pozbawiony zanieczyszczeń mogących stanowić słabe punkty układu.

Prezentowana praca była finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie decyzji O464/IP2/2011/71

LITERATURA

- [1] Sharbaugh A.H., Devins J.C., Rząd S.J., Progress in the field of electric breakdown in dielectric liquids, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 13 (1978), 249-276
- [2] Rząd S.J., Devins J.C., Schwabe R.J., Transient behavior in transformer oils: Prebreakdown and breakdown phenomena, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 14 (1979), 289-296
- [3] Lesaint O., Tobazeon R., Streamer generation and propagation in transformer oil under ac divergent fields conditions, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 23 (1988), 941-954
- [4] Nakao Y. i inni, Studies of impulse creepage discharges in transformer oil, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 26 (1991), 732-738
- [5] Lesaint O., Gournay P., Initiation and propagation thresholds of positive prebreakdown phenomena in hydrocarbon liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1 (1994), 702-708
- [6] Tobazeon R., Prebreakdown Phenomena In Dielectric Liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1 (1994), 1132 - 1147
- [7] Beroual A. i inni, Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 14 (1998) 6-17
- [8] Lesaint O., Top T., Streamer initiation in mineral oil, Part I: Electrode surface effect under impulse voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 9 (2002) 84-91
- [9] Top T., Massala G., Lesaint O., Streamer propagation in mineral oil in semi-uniform geometry, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 9 (2002), 76-83
- [10] Denat A., High field conduction and prebreakdown phenomena in dielectric liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 13 (2006) 518-525
- [11] Kim M., Hebner R.E., Initiation from a point anode in a dielectric liquid, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 13 (2006), 1254-1260
- [12] Torshin Yu. V., Schlieren registration of electrohydrodynamics phenomena in dielectric liquids under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 16 (2009), 470-474
- [13] Galczak J., Electrical discharges in transformer oil in set-up of paper insulated electrodes, *Archives of Electr. Eng.*, XLVIII (1999), 155-172
- [14] Galczak J., Wyładowanie elektryczne w oleju transformatorowym przy uderzeniach piorunowych w układach izolowanych elektrod, *Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe Nr 930, Łódź*, (2003)
- [15] Galczak J., Różga P., Wpływ papierowej otuliny izolacyjnej na parametry wyładowań elektrycznych w oleju transformatorowym, *VII Konferencja Naukowo-Techniczna "Transformatory Energetyczne i Specjalne"*, Kazimierz Dolny, (2008), 73-88
- [16] Rozga P., Mechanism of electrical discharges development in transformer oil in the setup of insulated electrodes, *Proceed. 2010 Intern. Conf. High Voltage Eng. and Appl.*, New Orleans, USA, (2010), 325-328
- [17] Rozga P., The influence of paper insulation on the prebreakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 11 (2011), 720-727
- [18] Rozga P., Properties of electrical discharges developing in transformer oil under lightning impulse in the setup of insulated electrodes, *High Voltage Eng.*, China, 8 (2013), 1805-1812
- [19] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A., Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa, (1983)
- [20] Lidmanowski W., Zarys teorii wyładowań w dielektrykach, WNT, Warszawa, (1988)
- [21] Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J, *High Voltage Engineering, Fundamentals, Butterworth-Heinemann, Great Britain*, (2000)
- [22] Mosiński F., O efekcie objętości szczególnie naprężonego oleju dla układów izolacji papierowo-olejowej, *Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe Elektryka, Nr 66*, (1979) 91-103
- [23] Mosiński F., Wpływ objętości dielektryków na ich wytrzymałość elektryczną, *VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna i-Mitel*, Gorzów Wlkp. (2012), 99-100
- [24] P. Rozga, F. Mosinski, D. Hantsz, *Numerical analysis of electrical field surrounded the model HV electrode setups with paper insulation immersed in oil*, 2012 Intern. Conf. High Voltage Eng. and Appl., Shanghai, China, (2012), 566-569
- [25] P. Rozga F., Metody statystyczne w technice wysokich napięć, Wydawnictwo PŁ, Łódź, (1995)
- [26] P. Rozga, D. Hantsz, Initiation of discharges in the setup of paper insulated electrodes in oil, *2013 Annual Report Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom.*, Shenzhen, China, (2013), 913-916
- [27] U. Gafvert, A. Jaksts, Ch. Tornkvist, L. Walfridson, "Electrical field distribution in transformer oil," *IEEE Trans. on Electr. Insul.*, vol. 27, pp. 647-660, 1992.
- [28] A. Khaligh, M. Vakilian, Power transformers internal insulation design improvements using electric field analysis through finite element methods," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 44, pp. 273-278, 2008.

Autor: dr. inż. Paweł Różga, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: pawel.rozga@p.lodz.pl;