

Wyładowania elektryczne w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta w wybranych cieczach dielektrycznych przy wysokim napięciu udarowym piorunowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki autorskich badań porównawczych dotyczących rozwoju wyładowań elektrycznych w oleju mineralnym, estrze syntetycznym i estrze naturalnym przy dodatnim napięciu udarowym piorunowym. Badania przeprowadzono w modelowym układzie elektrod ostrze-izolowana płyta o długości przerwy równej 10 mm. Wyniki pokazały, że oba estry wykazują gorsze właściwości niż badany olej mineralny przy narażeniach natury udarowej.

Abstract. The results of the comparative studies on the development of electrical discharges in mineral oil, synthetic ester and natural ester under positive lightning impulse voltage were presented in this paper. The studies were performed in the model point-insulating plate electrode system of 10 mm gap. The results showed that both the esters are characterized by worse properties than the tested mineral oil at the lightning stresses. (*Electrical discharges in point-insulating plate electrode system in selected dielectric liquids at high voltage lightning impulse*).

Słowa kluczowe: wyładowania elektryczne, udar napięciowy piorunowy, olej mineralny, estry dielektryczne.

Keywords: electrical discharges, lightning impulse, mineral oil, dielectric esters.

Wprowadzenie

Teorie związane z propagacją wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych i ich przebiegiem tworzone były na przestrzeni lat w oparciu o badania czystych węglowodorów ciekłych, ich mieszanin, a także olejów mineralnych różnego pochodzenia [1-3]. W ostatnich kilkunastu latach na rynku pojawiły się cieczce alternatywne dla oleju mineralnego z punktu widzenia właściwości proekologicznych. Są to syntetyczne i naturalne estry biodegradowalne [4-10]. Dla nich również zaczęto prowadzić badania mechanizmów propagacji porównując otrzymane wyniki z tymi dotyczącymi oleju mineralnego. Mimo, że w literaturze można znaleźć wiele danych na temat zachowania się estrów przy narażeniach udarowych to autorzy większości publikacji podkreślają ciągłą potrzebę rozszerzania wiedzy w tym zakresie, tak, aby tę wiedzę móc aplikować do praktyki inżynierskiej [6, 7, 9, 10].

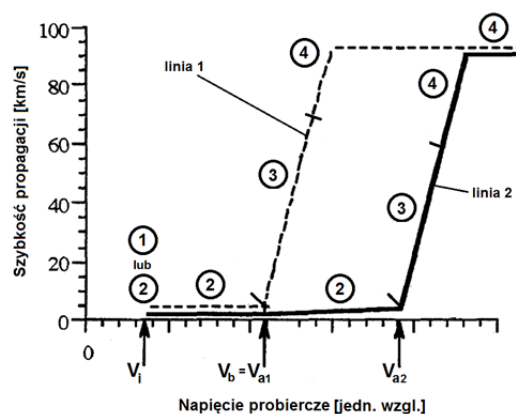
Wpisując się więc w zapotrzebowanie dotyczące badań nad estrami do zastosowań elektrycznych w badaniach autorskich podjęto próbę oceny porównawczej zachowania się estrów i oleju mineralnego w warunkach narażeń udarowych piorunowych w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wykonanych dla niewielkiej wolnej przerwy olejowej równej 10 mm przy uwzględnieniu 5 mm przekładki preszpanowej umieszczonej na elektrodzie uziemionej. W badaniach zastosowano dodatni udar napięciowy piorunowy jako ten o większej intensywności oddziaływania na układ izolacyjny.

Inicjacja i propagacja wyładowań w cieczach dielektrycznych - stan wiedzy

Większość prac badawczych dotyczących rozwoju wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych prowadzona jest z użyciem modelowych układów elektrod gołych ostrze-płyta, a więc układów o skrajnie nierównomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego [1, 3, 6, 7]. Stosowanie takich właśnie układów wynika z faktu, że nie wymagają one wysokich napięć inicjujących, które byłyby potrzebne w przypadku układów o quasi-równomiernym rozkładzie pola przy zastosowaniu takich samych przerw elektrodowych. Z drugiej strony układy ostrzowe w pewnym zakresie imitują defekty rzeczywistych układów izolacyjnych, w których niejednorodności stanowią mogą miejsca o lokalnie zwiększonym natężeniu pola

elektrycznego i w ich okolicy właśnie może dojść do zainicjowania wyładowania podczas przepięcia. Pewną odmianą układów ostrze-płyta są układy z zastosowaniem płyty preszpanowej ułożonej na elektrodzie uziemionej [9, 10]. Takie rozwiązanie ogranicza występowanie przebiega, przez co uzyskuje się efekt modelowania bardziej zbliżony do układów praktycznych, gdzie wyładowanie nigdy nie będzie rozwijać się bezpośrednio pomiędzy dwoma elementami przewodzącymi.

Wieloletnie badania eksperymentalne pozwoliły wypracować pewne teorie związane z inicjacją i propagacją wyładowań w cieczach. Zaznaczyć jednak należy, że ciągle nie został określony jednoznacznie mechanizm determinujący te zjawiska. W sposób względnie prosty można zaprezentować podejście do oceny rozwoju wyładowań w cieczach jak na rysunku 1. Stanowi on pewną modyfikację propozycji zaprezentowanej w [1].



Rys.1. Ogólna zależność szybkości propagacji wyładowań elektrycznych w cieczach od napięcia probierczego: V_i - napięcie inicjacji, V_{a1} , V_{a2} - napięcia przyspieszenia, V_b - napięcie przebiega, 1, 2, 3, 4 - kolejne fazy rozwoju wyładowań

Z rysunku wynika, że inicjacja wyładowań zachodzi w cieczach przy pewnej wartości napięcia probierczego V_i , zwanego napięciem inicjacji. Jego wartość jest charakterystyczna dla danej konfiguracji elektrod i zależy w głównej mierze od promienia krzywizny elektrody wysokiego napięcia (WN), a mniej od odległości pomiędzy

elektrodami [2, 3]. Inicjacja ma miejsce po przekroczeniu granicznej wartości natężenia pola elektrycznego, które ocenione zostało na 0,5-5 MV/cm. Inicjacja opiera się, niezależnie od biegunowości napięcia udarowego, na zjawisku generacji pęcherzyka gazowego w otoczeniu elektrody inicjującej, przy czym w przypadku biegunowości dodatniej mówi się o generacji pęcherzyków wskutek oddziaływania ciepła Joula lub jako wynik kawitacji będącej rezultatem oddziaływania sił elektromechanicznych na ciecz, zaś za decydujący proces przyczyniający się do inicjacji wyładowań ujemnych uznaje się elektronową emisję polową [1, 3, 6, 7]. Zwiększenie napięcia udarowego powyżej napięcia inicjacji powoduje rozwój wyładowań zgodnie z rysunkiem 1. Kolejne fazy rozwoju pojawiają się wraz ze zwiększającym się napięciem probierczym odniesionym do napięcia inicjacji w danych warunkach probierczych. Klasyfikację wyładowań pierwszy wprowadził Hebner [1] nadając poszczególnym fazom kolejne numery porządkowe. Rozwinięciem podejścia Hebnera jest natomiast powszechnie już stosowana numeracja zaproponowana przez Lesainta [2] dzieląca wyładowania, niezależnie od biegunowości, na powolne (1-go i 2-go rodzaju) oraz szybkie (3-go i 4-go rodzaju). Zastosowane przymiotniki "powolne" i "szybkie" związane są ze wspomnianą już szybkością propagacji wyładowań, która zdecydowanie rozróżnia te dwie grupy. Wyładowania powolne, jak widać na rysunku 1, charakteryzują się szybkościami propagacji rzędu kilku km/s, podczas gdy wyładowania szybkie charakteryzuje szybkość propagacji w granicach od kilkunastu do kilkudziesięciu km/s [2, 3, 7, 9]. Graniczna wartość napięcia, przy którym następuje gwałtowny wzrost szybkości propagacji wyładowań nazywa się napięciem przyspieszenia (z ang. acceleration voltage) i oznaczana jest symbolem V_a . W zależności od rodzaju cieczy (głównie jej składu chemicznego) przebiec może nastąpić wraz z przyspieszeniem propagacji (linia 1 na rysunku 1, gdzie $V_b = V_{a1}$), lub przy napięciu niższym od napięcia przyspieszenia (linia 2). Określenie napięcia przyspieszenia jest więc jednym z istotnych elementów oceny zachowania się danej cieczy przy narażeniach natury udarowej [2, 6, 10].

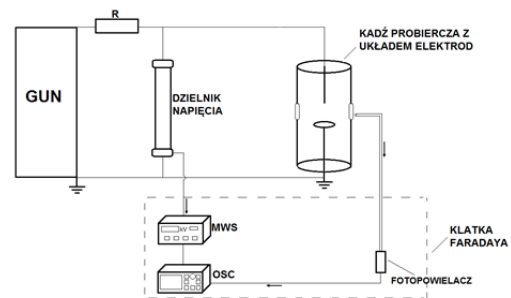
Generalizując powyższe zakłada się, że propagacja wyładowań powolnych, która odbywa się przy relatywnie niskich napięciach probierczych, a więc niższych wartościach natężenia pola elektrycznego, jest skutkiem tzw. jonizacji w fazie gazowej, gdzie kanał wyładowania wypełnia zjonizowany gaz. Przy wyższych napięciach probierczych, a więc i wyższych wartościach natężenia pola elektrycznego, kanał wyładowania wypełnia ciecz, a w procesie jonizacji biorą udział już także tzw. twarde molekuly cieczy, które mogą zostać bezpośrednio zjonizowane lub zająć może tzw. rotacyjno-wibracyjne ich wzbudzenie [3, 6, 10].

Oczywiście szybkość propagacji nie jest jedynym parametrem charakteryzującym poszczególne rodzaje wyładowań. Powolne i szybkie wyładowania można rozróżnić na podstawie ich kształtu przestrzennego i przede wszystkim na podstawie przebiegów światła emitowanego przez wyładowanie w czasie jego rozwoju [2, 3, 6, 10]. Ten ostatni wskaźnik wykorzystano w badaniach autorskich zaprezentowanych w niniejszym artykule.

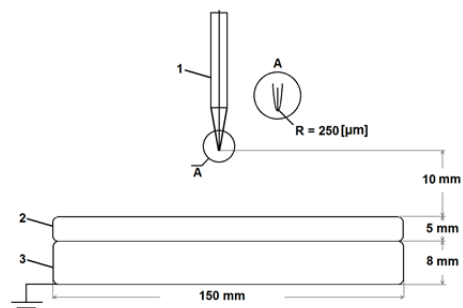
Układ probierczy

Badania przeprowadzono w układzie eksperymentalnym zaprezentowanym na rysunku 2. Źródłem napięcia w układzie był generator udarów napięciowych piorunowych Marxa. Generator ten wytwarzał standaryzowane napięcie udarowe piorunowe o czasach charakterystycznych 1,2/50 µs. Poprzez rezystor ograniczający udar doprowadzany był

do układu elektrod ostrze-izolowana płyta, zanurzonego w kadzi probierczej wypełnionej daną cieczą. Schematycznie układ ten pokazany został na rysunku 3.



Rys.2. Układ eksperymentalny wykorzystany w badaniach: GUN - generator udarów napięciowych piorunowych, R - rezystor ograniczający, OSC - oscyloskop cyfrowy, MWS - miernik wartości szczytowej



Rys.3. Schemat układu elektrod użytego w badaniach: 1 - elektroda WN, 2 - przelotka z preszpanu, 3 - elektroda uziomiona

Pomiar wartości szczytowej udaru był realizowany z użyciem rezystancyjnego dzielnika napięcia oraz miernika wartości szczytowej. Jednocześnie sygnał napięciowy z dzielnika rejestrowany był za pomocą oscyloskopu. Pomiaru światła dokonywano każdorazowo z użyciem fotopowielacza o zakresie widmowym 300-850 nm. Do fotopowielacza sygnał doprowadzony był światłowodem, którego końcówka umieszczona była w bocznym okienku kadzi probierczej. Wyjściowy sygnał z fotopowielacza po wzmocnieniu był rejestrowany przez oscyloskop w formie przebiegu czasowego razem z sygnałem napięciowym.

W badaniach użyto trzech cieczy dielektrycznych, które przed rozpoczęciem badań zdefiniowano podstawowymi parametrami dielektrycznymi, aby mieć pewność, że ich jakość nie wpłynie na otrzymane wyniki. Parametry te zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry dielektryczne badanych cieczy

Parametry	Rodzaj cieczy		
	Ester syntetyczny	Ester naturalny	Olej mineralny
Przemienne napięcie przebiecia [kV]	64	67	66
Tg δ	0,0108	0,0446	0,004
Zawartość wilgoci [ppm]	129	102	12

Cieczami badanymi były ester syntetyczny Midel 7131, ester naturalny Envirotemp FR3 oraz naftenowy olej mineralny Shell Diala Oil. Pomimo wyższych wartości zawilgocenia cieczy estrowych uznano, że nie powinno ono wpływać na wyniki badań przy napięciu udarowym, szczególnie, że nie wpływa ono na wartość przemienne napięcia przebiecia, które uznano za główny wyznacznik mówiący o jakości danej cieczy.

Wyniki

W pierwszym kroku wyznaczono napięcie inicjacji dla każdej z cieczy. Procedura szacowania bazowała na rozkładzie Weibulla, który zaaplikowano do analizy 15-tu wyznaczonych udarowych napięć inicjacji [9]. Każda z 15-tu wartości dotyczyła pojedynczej próby wykonanej metodą schodkową. Począwszy od pewnego poziomu napięcia, przy którym nie obserwowano rozwoju wyładowań, napięcie zwiększano z krokiem 2,5 kV aż do chwili, gdy następowała inicjacja. Ta inicjacja była widoczna na przebiegach światła, na których pojawiały się dyskretne impulsy reprezentujące kolejne skokowe wydłużenia kanałów wyładowania. W tabeli 2 zestawiono wyniki dotyczące oszacowania. Uwzględniono w niej kolejno:

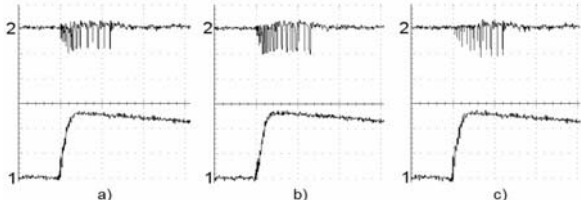
- parametr przesunięcia U_0 , dla którego wartość funkcji dystrybuanty $F(U_0) = 0$, i który oznacza progową wartość napięcia, poniżej której inicjacja wyładowań nie zachodzi,
- parametr skali U_m , dla którego $F(U_m) = 1 - e^{-1} \approx 0,632$ i który reprezentuje wartość napięcia, poniżej którego znajduje się 63,2 % analizowanej populacji napięć inicjacji,
- parametr kształtu k będący miarą rozrzutu danych,
- oraz dodatkowo medianę napięć U_{med} obliczoną na bazie podstawowych parametrów rozkładu Weibulla.

Tabela 2. Parametry rozkładu Weibulla udarowych napięć inicjacji

Parametry	Rodzaj cieczy		
	Ester syntetyczny	Ester naturalny	Olej mineralny
U_0 [kV]	49,9	49,3	43,2
U_m [kV]	55,8	54,4	55,3
k	0,9	1,6	4,2
U_{med} [kV]	53,7	53,4	54,3

Po uwzględnieniu podobieństwa w medianach napięć inicjacji ustalono startową wartość napięcia inicjacji na $U_i = 55$ kV. Wynikało to z zaokrąglenia w górę poszczególnych median do wartości stanowiącej kolejną krotność wcześniej ustalonego skoku. Od założonej wartości U_i , wartość szczytową udaru zwiększano z krokiem 0,2 $U_i = 11$ kV. Nie zakładano natomiast wartości maksymalnej napięcia probierczego, która została uzależniona od obserwowanych zjawisk. Założenia pomiarowe uwzględniały doprowadzenie 20 udarów na każdym poziomie napięcia. Rejestrowano rodzaj zjawiska występującego w danej cieczy z podziałem na wyładowania szybkie (3-go rzędu) oraz przeciebie. W każdym przypadku rejestrowano także oscylogramy światła i fali napięciowej, które pomagały w ocenie zachodzących zjawisk.

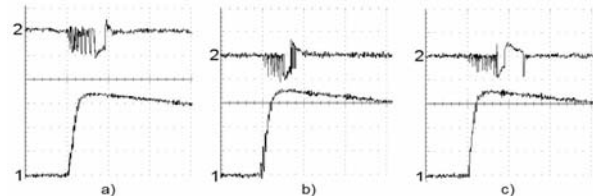
Pierwszym zaprezentowanym zestawem oscylogramów jest ten pochodzący z pomiarów przy napięciu inicjacji $U_i = 55$ kV. Zamieszczono go na rysunku 4.



Rys.4. Oscylogramy zarejestrowane podczas rozwoju dodatnich wyładowań przy napięciu inicjacji $U_i = 55$ kV, 1 - napięcie [20 kV/dz.], 2 - światło [jedn. wzgl.], $t = 4 \mu\text{s/dz.}$: a) ester syntetyczny, b) ester naturalny, c) olej mineralny

Na każdym z przebiegów widać serię dyskretnych impulsów światła, które zanikają po ok. 4-5 μs od chwili doprowadzenia udaru. Są to typowe wyładowania typu "stopping length", które ze względu na zbyt niskie natężenie pola elektrycznego istniejące w pewnym oddaleniu od

elektrody ostrzowej WN zanikają w przestrzeni międzyelektrodowej nie docierając do przeciwległej elektrody. W każdej z cieczy, przy napięciu inicjacji zaobserwowano ten sam typ zjawisk. Jediną różnicą, jaką można przytoczyć, jest większa częstotliwość i większa wartość szczytowa impulsów światła towarzysząca rozwojowi wyładowań w estrach. Wzrost napięcia do poziomu 1,2 U_i (66 kV) spowodował zmianę w rejestrowanych oscylogramach. Na końcu sekwencji dyskretnych impulsów pojawiał się szeroki impuls nasycający fotopowielacz. Przykład takich oscylogramów dla każdej z cieczy pokazano na rysunku 5.

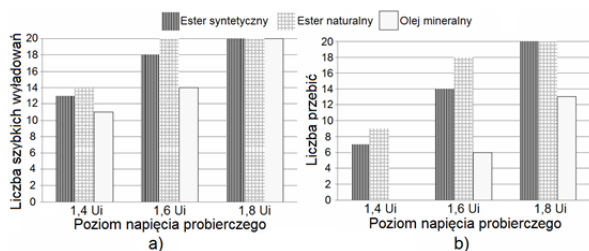


Rys.5. Oscylogramy zarejestrowane podczas rozwoju dodatnich wyładowań przy napięciu 1,2 $U_i = 66$ kV, 1 - napięcie [20 kV/dz.], 2 - światło [jedn. wzgl.], $t = 4 \mu\text{s/dz.}$: a) ester syntetyczny, b) ester naturalny, c) olej mineralny

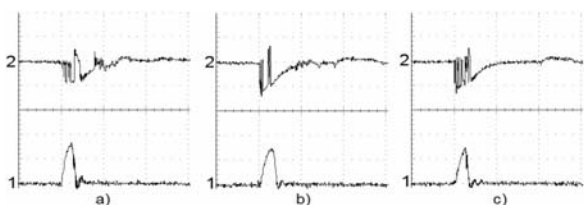
Zjawisko szerokiego impulsu kończącego sekwencję impulsów dyskretnych jest znanym zjawiskiem w układach izolowanych elektrod [10]. Wyładowanie, które dociera do przeciwległej elektrody pokrytej płytą izolacyjną rozprzestrzenia się w postaci wyładowań ślizgowych generując kanał powrotny będący wynikiem sprzężenia pojemnościowego pomiędzy elektrodą WN i uziemioną. We wszystkich trzech przypadkach rejestrowane zjawiska miały podobny charakter, a zaobserwowane zależności pomiędzy przebiegami światła odnotowane dla napięcia inicjacji U_i były także widoczne dla krotności 1,2 U_i . Dodatkowo zaobserwowano, że także szeroki impuls kończący wyładowanie był bardziej intensywny w przypadku estrów. Czas propagacji do osiągnięcia płyty izolacyjnej oceniono na podstawie oscylogramów na 2,5 do 3 μs . Stąd średnia szybkość propagacji, obliczona ze stosunku długości przerwy olejowej do tego czasu wahała się między 3,3 a 4 km/s, co jest szybkością charakterystyczną dla wyładowań powolnych [2, 3, 6, 7, 10].

Wzrost napięcia probierczego do 1,4 U_i spowodował znaczącą zmianę w charakterystyce wyładowań w poszczególnych cieczach. Różnice zaobserwowane dla tej wartości napięcia dodatkowo pogłębiły się przy wyższych krotnościach. Dla napięcia 1,4 U_i zaobserwowano pojawienie się wyładowań szybkich we wszystkich trzech cieczach. Proporcje tego typu wyładowań do wyładowań powolnych były jednak znacząco różne porównując rozpatrywane ciecze między sobą. Podobna sytuacja miała miejsce przy wyższych krotnościach. Dodatkowo od krotności 1,4 U_i w niektórych przypadkach dochodziło do przebicia, o czym informowały przebiegi czasowe napięcia. Kanał przebiciowy zwierzał elektrody po powierzchni płyty izolacyjnej nie niszcząc jej. Liczbowo, zarówno w przypadku wyładowań szybkich jak i faktu zaistnienia przebicia, oba estry wypadły zdecydowanie gorzej od badanego oleju mineralnego. Zestawienie zbiorcze zaobserwowanych zjawisk dotyczące wspomnianego już zakresu krotności 1,4-1,8 U_i pokazane zostało na rysunku 6. To, czy rozwijające się wyładowanie było szybkie czy powolne oceniono na podstawie oscylogramów światła. W przypadku wyładowań szybkich ten fakt był widoczny w czasie zdecydowanie krótszym niż 1 μs , co świadczyło o prędkościach co najmniej kilkunastu km/s. Jako przykład przebiegu dotyczącego wyładowań szybkich przytoczono rysunek 7 z zestawem oscylogramów dotyczących napięcia

probierczego równego $1,8 U_i$ i sytuacji, gdy nastąpiło przebiecie. Jak widać przebiecie nastąpiło na czole udaru, który nie osiągnął zadanej wartości szczytowej.



Rys.6. Zestawienie zjawisk zaobserwowanych w poszczególnych cieczach przy napięciu probierczym pomiędzy 1,4 a $1,8 U_i$: a) liczba zaobserwowanych szybkich wyładowań na 20 doprowadzonych udarów, b) liczba przebiec na 20 doprowadzonych udarów



Rys.7. Oscylogramy zarejestrowane podczas rozwoju dodatnich wyładowań przy napięciu $1,8 U_i = 99 \text{ kV}$, 1 - napięcie [20 kV/dz.], 2 - światło [jedn. wzgl.], $t = 1 \mu\text{s/dz.}$: a) ester syntetyczny, b) ester naturalny, c) olej mineralny

Ponieważ dla krotności $1,8 U_i$ w obu estrach zawsze dochodziło do przebiecia, zaniechano pomiarów przy wyższych krotnościach przyjmując, że badania do tej wartości napięcia probierczego przyniosły wystarczającą liczbę obserwacji pozwalającą na wyciągnięcie istotnych wniosków o zachowaniu poszczególnych cieczy przy napięciu udarowym piorunowym w małych przerwach układu elektrod ostrze-izolowana płyta.

Dyskusja i wnioski

W badanym układzie elektrod ostrze-izolowana płyta o bardzo małej przerwie elektrodowej możliwa była do zaobserwowania duża liczba różnorodnych zjawisk na danym poziomie napięcia, co jest odmiennie od klasycznie stosowanych układów elektrod gołych.

W przypadku propagacji wyładowań oba badane estry, podobnie jak w przypadku układów elektrod gołych, wykazały niższą odporność na pojawienie się szybkich energetycznych wyładowań, niż olej mineralny. Liczba tych wyładowań zarejestrowana dla krotności napięć inicjacji pomiędzy $1,4$ a $1,8 U_i$ była zawsze dużo wyższa w przypadku obu estrów niż w przypadku oleju mineralnego. Podobnie zdolność do formowania się kanału przebieciowego w estrach oceniona została jako wyższa - przebiecia następowały niemal zawsze już od krotności napięcia inicjacji równej $1,6 U_i$, podczas gdy dla oleju mineralnego dla tego poziomu napięcia rejestrowano zarówno wyładowania powolne, jak również szybkie niedoprowadzające do przebiecia, kończąc na przebieciu podobnym do tego zachodzącego w estrach. Wniosek ten zdecydowanie został wzmocniony przy dla napięcia $1,8 U_i$.

Odnosząc powyższe do teorii propagacji wyładowań elektrycznych w cieczach, można przypuszczać, że oba estry w małych przerwach elektrodowych układów ostrze-izolowana płyta, w porównaniu do oleju mineralnego, są bardziej podatne na pojawienie się takich typów wyładowań przy udarze biegunowości dodatniej, które propagują jako wynik tzw. jonizacji w fazie ciekłej (wyładowania o prędkościach ok. 20 km/s i wyższych). Kanały takich

wyładowań wydają się być bardziej energetyczne niż kanały wyładowań powolnych, co powoduje, że jeśli doprowadzą do przebiecia to jest ono charakteryzowane bardziej intensywnym oddziaływaniem na izolację stałą, która łatwiej może przez to ulec uszkodzeniu.

Przyczynę gorszych właściwości estrów w aspekcie wytrzymałości na przepięcia udarowe upatruje się w strukturze cząsteczkowej estrów, w której pojawiają się np. elektroujemne atomy tlenu. Mogą one bowiem powodować przyspieszenie wyładowań [6, 7]. Biorąc dodatkowo pod uwagę, że teoria o możliwej jonizacji twardych molekuł w cieczy w polu elektrycznym o wysokim natężeniu jest prawdziwa, to generacja szybkich wyładowań 3-go rodzaju może zająć w estrach przy znacznie niższym napięciu niż w oleju mineralnym, gdyż przy niższej energii jonizacji łatwiej dojdzie do bezpośredniego zjonizowania takich molekuł lub do ich wibracyjno-rotacyjnego wzbudzenia.

Wobec powyższego, można sformułować pewien praktyczny wniosek na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Chociaż ograniczenie przerw olejowych w transformatorach jest możliwe, np. przy użyciu przegród, to na prędkość rozchodzenia się już zainicjowanych wyładowań pod wpływem udaru napięciowego piorunowego nie można mieć wpływu. Wydaje się więc, że ograniczanie przepięć, w przypadku transformatora z izolacją ciekłą w postaci estru syntetycznego lub naturalnego, może mieć w takim wypadku największe znaczenie. Eliminację potencjalnego powodu pojawienia się szybkich energetycznych wyładowań w wyniku przepięć natury udarowej można postawić za główny cel procesu koordynacji izolacji w transformatorach napełnianych estrami.

Artykuł powstał na bazie projektu badawczego finansowanego przez NCN o nr ST8/03549.

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

LITERATURA

- [1] Hebner R.E., Measurement of electrical breakdown in liquids, NATO ASI series, Vol. B193, (1988)
- [2] Lesaint O., Massala G., Positive streamer propagation in large oil gaps: Experimental characterization of propagation mode, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 5 (1998), n.3, 360-370
- [3] Beroual A. i inni, Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 14 (1998), n.2, 6-17
- [4] Dai J., Wang Z. D., A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oil, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 15 (2008), n.2, 1582-1594
- [5] Perrier C., Beroual A., Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester and silicone oils, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 25 (2009), n.6, 6-13
- [6] Liu Q., Wang, Z. D., Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 18 (2011), n.1, 285-294
- [7] Dang V-H., Beroual, A., Perrier, C., Investigations on streamers phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 19 (2012), n.5, 1521-1527
- [8] Malinowski G., Morańda H., Siodła K., Wyładowania niepełne w estrze syntetycznym w zależności od temperatury, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.10, 68-70
- [9] Rózga P., Rozwój wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym przy napięciu udarowym piorunowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.2, 14-17
- [10] Rózga P., Streamer propagation in a non-uniform electric field under lightning impulse in short gaps insulated with natural ester and mineral oil, *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, 64 (2016), n.1, 171-179