

Dynamika wyładowań elektrycznych rozwijających się w oleju transformatorowym od izolowanej elektrody WN

Streszczenie. Artykuł dotyczy zagadnienia wyładowań elektrycznych rozwijających się w oleju transformatorowym o czystości technicznej pod wpływem udarów piorunowych obu biegunowości. Omówiono w nim wyniki badań eksperymentalnych wykonanych dla dwóch układów: elektroda WN – uziemiona płyta, różniących się stopniem nierównomierności pola elektrycznego. W każdym z układów użyto dwóch typów elektrod WN identycznych pod względem obrysu zewnętrznego: gołej i izolowanej papierem.

Abstract. Article concerns the problem of electrical discharges developing in transformer oil under lightning impulse of both polarities. The results of experimental studies performed for two setups: HV electrode – grounded plane, of different electrical field distribution, were discussed. For both setups, two types of HV electrodes with identical outer dimensions: bare and paper insulated, were used. (*Dynamics of the Electrical Discharges Developing in Transformer Oil from Insulated HV Electrode*).

Słowa kluczowe: wyładowania w oleju, elektrody izolowane, metoda cieniowa, napięcie udarowe piorunowe.

Keywords: discharges in oil, insulated electrodes, shadowgraph method, lightning impulse.

Wstęp

Wyładowania elektryczne w dielektrykach ciekłych są tematem badań od wielu lat [1, 2]. Najbardziej użytkowym ich przedstawicielem jest olej transformatorowy, na którym skoncentrowana została istotna część prac badawczych. Wyniki prezentowane w literaturze dotyczą jednak głównie układów gołych elektrod o dużym stopniu nierównomierności pola (igła-płyta). Takie układy, mimo iż są bardzo użyteczne z eksperymentalnego punktu widzenia, nie posiadają znaczącego odniesienia praktycznego, ponieważ w rzeczywistych układach izolacyjnych elektrody są zawsze pokryte papierem, a pole jest quasi nierównomierne. Zatem użycie w badaniach elektrod pokrytych otuliną izolacyjną oraz wykorzystanie oleju transformatorowego o czystości technicznej pozwoliło odnieść uzyskane wyniki do praktycznych układów o izolacji papierowo-olejowej. Wyniki te oraz wykonane na ich podstawie obliczenia umożliwiły odtworzenie sekwencji zdarzeń wyładowczych w obecności otuliny izolacyjnej na elektrodzie WN i bez niej. Pozwoliło to odpowiedzieć na pytanie o rolę otuliny izolacyjnej w mechanizmie inicjacji i rozwoju wyładowań elektrycznych w oleju transformatorowym, a także ocenić jej wpływ na dynamikę rozwoju tych wyładowań.

Układy eksperymentalne

Badania zostały wykonane w laboratorium, które składa się z dwóch współpracujących ze sobą układów eksperymentalnych. Pierwszy z nich pozwalał na rejestrację fotograficzną wyładowań rozwijających się w oleju. W układzie zastosowano jednokadrową metodę cieniową, w której jako lampy błyskowej użyto lasera Nd:YAG o komutacji dobroti. Laser generował impuls gigantyczny o długości fali $\lambda = 1064$ nm,

szerokości czasowej 10 ns i energii około 20 mJ. Z tak wygenerowanego impulsu, z użyciem kryształu KDP i polaryzatora Wollastona, wyselekcjonowano jego drugą harmoniczną czyli światło barwy zielonej o $\lambda = 532$ nm, i w tym świetle wykonywano fotografie. Drugi układ eksperymentalny umożliwiał rejestrację impulsów świetlnych emitowanych przez kanały wyładowań. Jako detektora światła użyto w nim fotopowielacza Hamamatsu R1925, natomiast do rejestracji przebiegów czasowych impulsów wykorzystany został szerokopasmowy oscyloskop cyfrowy Tektronix TDS 3052 o częstotliwości próbkowania do 5 Gs/s. Oba układy pracowały jednocześnie. Ciąg impulsów światła rejestrowanych przez fotopowielacz, po wzmocnieniu, został doprowadzony do Detektora Inicjacji Wyładowania (DIW), który był uruchamiany przez pierwszy z tych impulsów. Impuls wyjściowy z DIW informował natomiast o początku wyładowania i jednocześnie, po odpowiednio określonym czasie opóźnienia, wyzwalał laser impulsowy. Dzięki temu możliwe było wykonanie fotografii w dowolnej chwili od momentu inicjacji wyładowania. Pierwszy impuls świetlny był także impulsem wyzwalającym podstawę czasu oscyloskopu. Wszystkie elektroniczne urządzenia sterujące i pomiarowe wykorzystywane w obu układach, w celu zabezpieczenia ich przed skutkami oddziaływania pola elektrycznego pochodzącego od pracującego generatora udarów napięciowych, a także przed skutkami przepięć przenoszonych przez sieć zasilającą, zostały umieszczone w klatce Faradaya ze skutecznym filtrem sieciowym. Ich komunikacja z zewnętrzną aparaturą pomiarową (zasilacz WN lasera, aparat fotograficzny, układ wyzwalań generatora) zrealizowana została z wykorzystaniem światłowodów. Źródłem napięcia udarowego był sześciostopniowy generator udarów napięciowych Marxa wytwarzający znormalizowany udar napięciowy 1,2/50 μ s.

Metodyka badań

Badania przeprowadzone zostały dla dwóch układów izolowanych elektrod WN różniących się stopniem nierównomierności pola elektrycznego:

- układ A – układ o polu skrajnie nierównomiernym,
- układ B – układ o polu umiarkowanie nierównomiernym.

W obu przypadkach zastosowano badania porównawcze tzn. obok elektrody izolowanej, wykonano również badania z gołą elektrodą WN posiadającą te same wymiary zewnętrzne co elektroda z izolacją. Układy badanych elektrod, oparte na odpowiadających im konstrukcjach wsporczych, umieszczano w kadzi wypełnionej olejem, której objętość wynosiła 200 litrów. Badania wykonywano w oleju transformatorowym o czystości technicznej, używanym do zalewania jednostek transformatorowych dużej mocy, określoną nazwą użytkową Shell Diala Oil. Po każdym dniu pracy olej był poddawany procesowi regeneracji poprzez filtrację, osuszanie i odpowietrzanie. Olej był dopuszczany do prób, gdy jego przemienne napięcie przebicia mierzone w znormalizowanym układzie elektrod było nie mniejsze niż 55 kV.

Izolowaną elektrodę WN układu A stanowił drut mosiężny o średnicy 4 mm wygięty w kształt litery U, którego półkolista dolna część została obustronnie sfrezowana tak, że w poprzecznym przekroju osiowym powstał klin o kącie wierzchołkowym 20°. Elektrodę pokryto podwójną warstwą taśmy z papieru marszczonego o szerokości 8 mm, uzyskując w ten sposób izolację na elektrodzie o grubości 0,4 mm. Gołą elektrodę w układzie A stanowił natomiast odlew mosiężny, który poprzez stosowną obróbkę mechaniczną (szlifowanie i polerowanie) dostosowano do wymiarów zewnętrznych elektrody z izolacją. W układzie A jako elektrody uziemionej użyto aluminiowego krążka o średnicy 195 mm. Aby zapobiec wyładowaniom zupełnym w układzie, niszczącym otulinę na elektrodzie WN i uniemożliwiającym tym samym wielokrotne jej użycie, na elektrodzie uziemionej ułożono płytę z preszpanu o grubości 5 mm. Ustalając całkowity

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

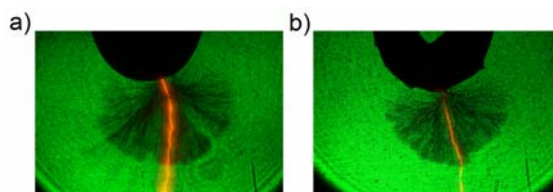
odstęp elektrod na 25 mm i uwzględniając grubość płyty izolacyjnej, otrzymano długość wolnej przerwy olejowej równą 20 mm.

Izolowaną elektrodę WN w układzie B stanowił miedziany płaskownik nawojowy o wymiarach 140x12x2,2 mm posiadający fabryczną izolację papierową o grubości 0,2 mm. Płaskownik umieszczono na konstrukcji wsporczej wykonanej z walców o promieniu 25 mm, które zakończone były czaszą o tym samym promieniu. Jako elektrody gołej użyto także płaskownika miedzianego, któremu poprzez obróbkę mechaniczną nadano wymiary elektrody z izolacją, czyli 140x12x2,6 mm. W porównaniu do układu A, zmniejszono średnicę elektrody uziemionej do 60 mm i dodatkowo zaokrąglono jej krawędzie uzyskując promień 25 mm. Elektrodę tą utwierdzono na stałe w obudowie izolowanej, a całość przykryto, podobnie jak w układzie A, płytą izolacyjną z preszpanu o grubości 5 mm. Badania w układzie B wykonano dla wolnej przerwy olejowej równej 10 mm. Założenia, co do konstrukcji układu B, pozwoliły otrzymać taki rozkład pola geometrycznego w układzie, że miejsca inicjacji wyładowania ograniczały się tylko do powierzchni użytecznej elektrody WN. Odczytana z wykresów teoretyczna wytrzymałość udarowa olejowej przerwy międzyelektrodowej uwzględniająca odległość pomiędzy metalową elektrodą płytową a czaszą konstrukcji wsporczej wynosiła powyżej 300 kV.

Dla obu układów elektrod i obu rodzajów elektrod (izolowanej i gołej) użytych w badaniach, pomierzone zostały, według procedury opisanej w [3], parametry charakteryzujące wyładowania tj.: napięcie inicjacji U_0 , czas do inicjacji t_d , szybkość propagacji v oraz czas narastania impulsów świetlnych t_n . Wartości parametrów zostały oszacowane statystycznie, a następnie dokonano porównania ich ze sobą i skorelowano z fotografiami wyładowań i oscylogramami światła. Dodatkowo, dla elektrody gołej wykonano pomiary i oszacowano parametry wyładowań przy napięciu równym średniemu napięciu inicjacji elektrod izolowanych. Poszczególne parametry dotyczyły wyłącznie wyładowań 2-go rzędu, jako wyładowań pojawiających się przy napięciu początkowym.

Wyniki badań i dyskusja

W pierwszej kolejności porównano ze sobą kształty tworów wyładowczych zarejestrowanych fotograficznie.



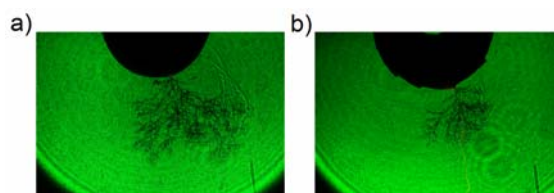
Rys.1. Przykład fotografii wyładowań dodatnich: a) rozwijających się od gołej elektrody WN, $U_p = 189,6$ kV; b) rozwijających się od izolowanej elektrody WN, $U_0 = 189,6$ kV

Wyraźnie widać, że kształty te, odpowiadające danej biegunowości udaru, są identyczne niezależnie od tego czy elektroda jest goła czy izolowana. Takie podobieństwo dotyczyło obu układów elektrod wykorzystanych w badaniach, a więc rozkład pola geometrycznego także nie powodował różnic. Przykładowe fotografie dotyczące układu A zaprezentowane zostały na rysunkach 1 i 2.

W dalszej kolejności zbadano wpływ otuliny izolacyjnej na elektrodzie WN na mechanizm inicjacji, a także dynamikę rozwoju wyładowań elektrycznych w oleju transformatorowym pod wpływem napięcia udarowego piorunowego. Wpływ określony

został w odniesieniu do pomierzonych parametrów charakteryzujących wyładowania. Potencjalnie mógłby on prowadzić, w porównaniu do elektrod gołych, do:

- zmiany kształtu impulsów świetlnych i ich charakterystycznych czasów;
- utrudnienia procesów inicjacyjnych, które musiałyby zachodzić w słabych punktach w samym oleju (lub w otulinie izolacyjnej), a nie na powierzchni metalu;
- powiększenia napięcia inicjacji wyładowań wskutek odsunięcia obszaru inicjacji wyładowania w obszar o mniejszym natężeniu pola elektrycznego niż to, które panuje na powierzchni gołej elektrody;
- spowolnienia rozwoju kanałów wyładowań wskutek ograniczenia wartości prądu wyładowania przez pojemność otuliny izolacyjnej, a więc przez spadek napięcia na niej.



Rys.2. Przykład fotografii wyładowań ujemnych: a) rozwijających się od gołej elektrody WN, $U_p = 192$ kV; b) rozwijających się od izolowanej elektrody WN, $U_o = 192$ kV

Pierwszy aspekt rozpatrzono porównując ze sobą kształty pojedynczych impulsów światła zarejestrowanych podczas rozwoju wyładowania od gołej i izolowanej elektrody WN w układzie A, a także średnie czasy narastania tych impulsów. W obu przypadkach nie stwierdzono różnic. Impulsy są jednakowe pod względem kształtu, a obliczone średnie czasy ich narastania praktycznie są sobie równe. Dotyczy to obu biegunowości udaru.

Tabela 1. Średnie czasy narastania impulsów światła dla przypadku układu A

Biegunowość udaru	Elektroda goła	Elektroda izolowana
	Czasy narastania [ns]	
+	4,4	4,3
-	4,5	4,4

Drugi aspekt związany jest z inicjacją wyładowania. Wyniki pomiarów czasów do inicjacji z elektrody gołej i izolowanej przy tym samym napięciu skłaniają do stwierdzenia, że to olej, nie powierzchnia elektrody lub otuliny jest „zbiornikiem” miejsc inicjacji wyładowań. Te czasy, zamieszczone w tabeli 2, w obu przypadkach są niemal identyczne, wskutek czego można wnioskować, że nie ma na nie wpływu struktura powierzchni, u której wyładowania brały początek. Ewentualność, że dwie odmienne fizycznie powierzchnie mogłyby być równie wydajnymi źródłami miejsc inicjacji jest bowiem mało prawdopodobna.

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Tabela 2. Średnie czasy do inicjacji t_d przy tym samym napięciu probierczym (rozkład logarytm-normalny)

		Układ A		Układ B	
Biegunowość napięcia		+	-	+	-
Elektroda goła	t_d [μ s]	4,99	4,66	4,44	3,78
Elektroda izolowana	t_d [μ s]	4,96	4,56	4,66	3,46

Otrzymane wyniki są potwierdzeniem wcześniejszych wniosków płynących z badań dotyczących skutków implementacji sztucznych słabych punktów na powierzchni otuliny izolacyjnej lub w niej [4]. Założenia, że obniżą one napięcie inicjacji nie sprawdziły się, a wyniki okazały się przeciwne do oczekiwań – wytrzymałość układu elektrod rozumiana jako parametr przesunięcia rozkładu Weibulla powiększyła się zamiast zmaleć. Implementowane „słabe punkty” nie okazały się słabymi punktami układu izolacyjnego, a zatem ich udział w procesach inicjacyjnych można uznać za marginalny. Za siedlisko „słabych punktów” można z powodzeniem uznać zatem sam olej. Ten sam wniosek można wysnuć analizując fotografie przedstawione w [5] prezentujące wyraźne rozwidlenie kanałów wyładowań pod powierzchnią otuliny. Zgodnie z przedstawionym w tym artykule opisem inicjacja musiała nastąpić w miejscu tego rozwidlenia. Prawdopodobny dalszy przebieg wyładowania w takiej sytuacji, to rozwój kanałów do otuliny, a po zapewnieniu im dobrego sprzężenia pojemnościowego z metalem elektrody propagacja w głąb przestrzeni olejowej. Alternatywny scenariusz, a więc spotkanie się w jednym punkcie kilku kanałów wyładowań jednocześnie, jest niemożliwy.

Trzeci aspekt dotyczy napięć inicjacji. Jest rzeczą oczywistą, że otulina izolacyjna powiększa to napięcie i taka sytuacja miała też miejsce w przypadku obu badanych układów elektrod. Porównując bowiem średnie napięcia początkowe odpowiadających sobie elektrod izolowanych i elektrod pozbawionych izolacji otrzymujemy dla układu A różnicę około 40 kV, a w układzie B 30 kV na korzyść elektrod izolowanych właśnie. Różnicy tej towarzyszy, jak się należało spodziewać, różnica w czasach do inicjacji. Większa wartość U_0 odpowiada krótszemu czasowi do inicjacji.

Tabela 3. Średnie wartości napięć początkowych (rozkład Weibulla) i czasów do inicjacji (rozkład logarytm-normalny) dla układu A i B; * oznacza, że stosownych czasów nie mierzono

Rodzaj elektrody			Elektroda pozbawiona na otuliny izolacyjnej	Izolowana elektroda	Goła elektroda
Układ A	U_0 [kV]	+	148,8	189,8	173,2
		-	148,8	192,1	173,4
	t_d [μ s]	+	-----*	4,96	8,69
		-	-----*	4,56	5,15
Układ B	U_0 [kV]	+	186,6	216,2	213,1
		-	189,8	220,6	208,3
	t_d [μ s]	+	-----*	4,66	4,78
		-	-----*	3,46	3,92

Warto jednak zauważyć, co wynika z tabeli 3, że napięcie początkowe wyładowań dla gołej elektrody nie wynosi tyle samo, co izolowanej, co pozornie pozostaje w sprzeczności z wnioskiem o kąpieli olejowej jako źródle punktów inicjacji wyładowań. Jednocześnie jednak czasy do inicjacji w przypadku gołej elektrody są dłuższe niż dla izolowanej, zatem wyższym napięciom inicjacji odpowiadają dłuższe

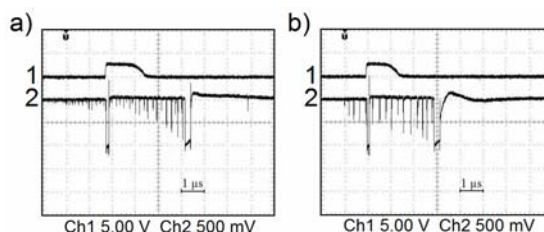
czasy do inicjacji, co jest znaną zależnością dotyczącą zarówno układów papierowo-olejowych jak i olejowych w zakresie udarowych piorunowych napięć przebiecia. Ta zależność może być rozpatrywana także z punktu widzenia objętości najbardziej naprężanej cieczy – wyższym napięciom odpowiada większa objętość, a zatem krótszy czas do przeskoku; jeżeli wniosek o kąpieli olejowej jako źródle miejsc inicjacji jest słuszny, w większej objętości istnieje większa liczba takich miejsc, co musi prowadzić do zmniejszenia czasu do przeskoku.

Ostatni aspekt związany jest z szybkością propagacji wyładowań. Dla obu rodzajów elektrod i obu biegunowości udaru, oraz różnych stopni nierównomierności pola, nie zaobserwowano znaczących różnic w średnich szybkościach propagacji. Szczególnie widoczne jest to, gdy rozpatrujemy szybkości propagacji kanałów, które rozwijają się przy tym samym napięciu probierczym. Powyższe wnioski zobrazowano w tabeli 4, gdzie przedstawiono stosunki prędkości propagacji wyładowań rozwijających się od elektrody izolowanej v_{iz} i gołej v_g , dla różnych napięć probierczych doprowadzonych do tej drugiej (U_0 – oznacza pomiary przy napięciu inicjacji elektrody gołej, U_{0iz} – pomiary przy napięciu równym średniemu napięciu grupy elektrod izolowanych).

Tabela 4. Stosunek prędkości propagacji wyładowań przy różnych napięciach doprowadzonych do gołej elektrody

Napięcie probiercze doprowadzone do gołej elektrody		Biegunowość udaru	
		+	+
		Stosunek prędkości propagacji	
		v_{iz}/v_g	v_{iz}/v_g
Układ A	$U = U_0$	1,08	1,15
	$U = U_{0iz}$	0,97	0,96
Układ B	$U = U_0$	1,06	1,06
	$U = U_{0iz}$	0,98	1,01

Z tabeli 4 wynika więc, że otulina izolacyjna nie spowalnia kanałów wyładowań. Zatem spadek napięcia na niej od prądów wyładowań jest na tyle mały, że nie jest w stanie upośledzić ich rozwoju. Wykonane w [5] szacunkowe obliczenia wykazały, że spadek ten, przy założeniu czasu narastania pojedynczego impulsu prądowego 5 ns (a więc o wartości zbliżonej do średniego czasu narastania rejestrowanych w niniejszej pracy impulsów światła), wynosi zaledwie kilka kV. Tak niewielka wartość w stosunku do wartości szczytowej udaru probierczego nie może zatem wpłynąć na przebieg wyładowania. Powyższe wnioskowanie pokrywa się z wynikami prac Forstera [1], u którego nawet mniej zjonizowane, a więc charakteryzujące się większym gradientem wzdłużnym, wyładowania ujemne nie przestały rozwijać się nawet wtedy, gdy napięcie probiercze spadło znacznie poniżej połowy wartości szczytowej.



Rys.3. Przykłady oscylogramów światła emitowanego podczas wyładowania: a) goła elektroda WN, b) izolowana elektroda WN

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Istotne znaczenie dla określenia dynamiki rozwoju wyładowań elektrycznych w układzie izolowanych elektrod mają oscylogramy światła.

W przypadku obu przebadanych układów elektrod można zauważyć dwie następujące prawidłowości. Po pierwsze wyładowania rozwijające się od izolowanej elektrody WN charakteryzują się mniejszą liczbą impulsów światła na jednostkę czasu; inaczej mówiąc dłuższe są czasy pomiędzy kolejnymi impulsami pojawiającymi się na przebiegu. Po drugie znacząco różnią się wartości szczytowe rejestrowanych impulsów. W obu wypadkach impulsy narastają liniowo w czasie, jednak dla tych samych chwil czasowych w fazie rozwoju bliskiej inicjacji, nawet kilkukrotnie wyższą wartość posiadają impulsy towarzyszące wyładowaniom od izolowanej elektrody WN. Im bliżej elektrody uziemionej różnice te są mniejsze a nawet zanikają. Powyżej przytoczone prawidłowości, widoczne na rysunku 3, można wyjaśnić jak poniżej.

Po rozbłysku kanału wyładowania, w przestrzeni międzyelektrodowej pozostają ładunki obu znaków; te o znaku zgodnym ze znakiem elektrody WN odsuwane są przez siły pola w głąb cieczy, te o znaku przeciwnym osiadają na powierzchni elektrody. Ponowny zapłon wyładowania w kanale wymaga przywrócenia u powierzchni elektrody natężenia pola zdolnego ten zapłon zainicjować. Wartość chwilowa składowej normalnej natężenia pola zależy już nie tylko od chwilowej wartości napięcia probierczego, ale także od gęstości ładunku powierzchniowego oraz gęstości i odległości od powierzchni elektrody ładunku przestrzennego; one oba osłabiają pole geometryczne. Przywrócenie warunków ponownej inicjacji zależy od szybkości zaniku ładunku powierzchniowego i – przynajmniej w początkowych stadiach wyładowania – od jego chwilowej pozycji w stosunku do powierzchni elektrody.

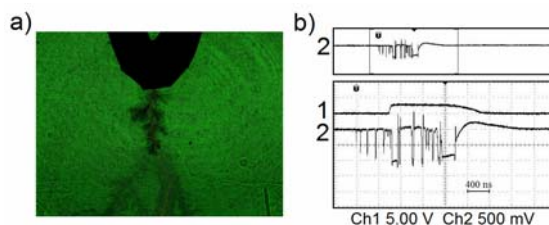
W przedstawionych powyżej rozważaniach należy upatrywać różnic pomiędzy oscylogramami wyładowań z gołej i izolowanej elektrody. W tym pierwszym przypadku ładunek powierzchniowy zostanie szybko zneutralizowany, w tym drugim – bez kontaktu z metalem elektrody – musi zostać rozproszony w wyniku dyfuzji i w wyniku oddziaływania nań stycznych składowych natężenia pola. Warunki do ponownego zapłonu zostaną przywrócone zatem w pierwszym przypadku szybciej niż w drugim – stąd różnice czasowe pomiędzy kolejnymi impulsami światła.

Te różnice przedkładają się na odległości, na jakie zostanie odsunięty ładunek przestrzenny w głąb przestrzeni międzyelektrodowej; gdy elektroda jest goła ta odległość jest mniejsza, gdy izolowana, większa. Ładunek przestrzenny oddziałuje hamująco na rozwój kolejnej fazy wyładowania – tym bardziej hamująco, im bliższy jest powierzchni elektrody; można zatem wnioskować, że w przypadku elektrody izolowanej kolejne wyładowanie będzie bardziej intensywne, niż w przypadku elektrody gołej. Tę hipotezę potwierdzają oscylogramy przytoczone na rysunku 3 – istotnie w fazie rozwoju bliskiej inicjacji impulsy światła odpowiadające izolowanej elektrodzie są wyraźnie wyższe. Różnice w wysokości impulsów stopniowo maleją w miarę powiększania się zasięgu wyładowania, gdyż siły pola powodujące przemieszczanie się ładunku przestrzennego są coraz mniejsze w polu nierównomiernym i ich wpływ staje się coraz mniej znaczący w miarę zbliżania się kanałów wyładowań do uziemionej elektrody.

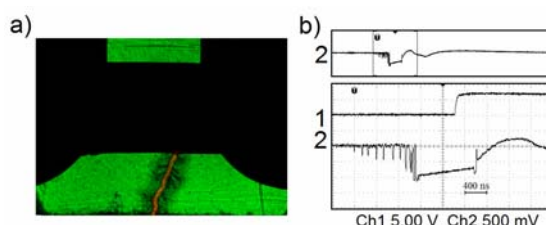
Wysokość impulsów światła określająca intensywność wyładowania jest miarą stopnia rozgałęziania kanałów wyładowań, co można zauważyć na oscylogramach wyładowań 3-go rzędu uzyskanych w kilku przypadkach w układzie A (rys.4) i potwierdzonych w układzie B (rys.5).

Te wyładowania są słabo rozgałęzione aż do osiągnięcia przez kanały zasięgu odpowiadającego 0,5 do nawet 0,9 długości przerwy międzyelektrodowej i w czasie odpowiadającym temu zasięgowi impulsy światła są prawie równe; ich wyraźny wzrost zaczyna się od chwili, gdy następuje obfitsze rozgałęzienie. Ta obserwacja znajduje

potwierdzenie w wynikach badań nad rozwojem tzw. monokanału czyli skrajnej nie rozgałęziającej się postaci wyładowania 2-go rzędu. Dla takiego typu wyładowania odpowiadające mu impulsy prądu w całym czasie rozwoju kanału zachowują jednakową wartość szczytową.



Rys.4. Przykład fotografii wyładowania dodatniego 3-go rzędu wykonanej w układzie A z odpowiadającym jej oscylogramem światła: elektroda izolowana, $U_0 = 197$ kV



Rys.5. Przykład fotografii wyładowania dodatniego 3-go rzędu wykonanej w układzie B z odpowiadającym jej oscylogramem światła: elektroda izolowana, $U_0 = 240$ kV

Wnioski

Z analizy wyników przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

- źródłem „słabych punktów” układu izolacyjnego papierowo-olejowego, w których można się spodziewać inicjacji wyładowań w oleju o czystości technicznej, jest kąpiel olejowa, nie zaś powierzchnia elektrody czy też otuliny izolacyjnej; należy jednak podkreślić, że uogólnienie tego wniosku na układy izolacyjne o dowolnym rozkładzie pola wymagałoby dodatkowych badań eksperymentalnych w tym także analizy numerycznej rozkładu pola;
- aczkolwiek mierzalne parametry wyładowań w układach izolowanych i gołych elektrod o tym samym obrysie zewnętrznym i tym samym napięciu probierczym są takie same, to jednak dynamika wyładowań jest w obu przypadkach odmienna.

LITERATURA

- [1] Forster E. O., Wong P., High Speed Laser-Schlieren Studies of Electrical Breakdown in Liquid Hydrocarbons, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.2 (1977), n.6, 435-442
- [2] Lesaint O., Top T., Streamer Initiation in Mineral Oil, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.9 (2002), n.1, 84-91
- [3] Różga P., Rola otuliny izolacyjnej w mechanizmie rozwoju wyładowań elektrycznych w oleju transformatorowym przy udarach piorunowych, *Energetyka*, (2009), nr.6 (660), 335-339
- [4] Gałczak J., Electrical discharges in mineral oil developing from insulated transformer wire to plane, *Archives of Electrical Engineering*, Vol.LIII (2004), n.4, 353-367
- [5] Gałczak J., Electrical discharges in transformer oil in set-up of paper insulated electrodes. *Archives of Electrical Engineering*, Vol.XLVIII (1999), n.1-2, 155-172

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